

Рис. 3. Изменение во времени параметров теплового режима в пятой зоне печи №6: 1 – $t_{гс}(\tau)$; 2 – $t_{нов}(\tau)$; 3 – $\Delta t = t_{изм}(\tau) - t_{расч}(\tau)$; 4 – $t_{изм}(\tau)$; 5 – $t_{расч}(\tau)$; 6 – $V_T(\tau)$ при коррекции прогнозируемого расчетного значения $t_{расч}(\tau)$

Использование рассмотренного метода гаранти

рует невозможность несанкционированной и неконтролируемой выдачи на стан недогретой заготовки при реализации энергосберегающего оптимального управления режимом нагрева крупногабаритных труднодеформируемых непрерывнолитых заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельский А.М., Дубинский М.Ю. и др. Устройство для измерения температуры нагрева объектов в металлургических печах: патент РФ на полезную модель №72061 БН. 2008. №9.
2. Парсункин Б.Н., Панферов В.И. Контроль прогрева металла // Изв. вузов Черная металлургия. 1981. №10. С. 127-129.
3. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режима управления нагревом заготовок в печах проходного типа. Магнитогорск: Из-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова. 2013. 376 с.

INFORMATION IN ENGLISH

ACCURACY INVESTIGATION OF TEMPERATURE CONTROL METHOD FOR HEATED CONTINUOUSLY CAST BILLETS BEFORE DISCHARGE

Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Akhmetova A.U.

The system of software and tool control of billet temperature prior to discharge from the furnace was developed. The research group conducted the study to determine the reasonable accuracy, objectivity and efficiency of the developed system. The possibilities of the system under conditions of an industrial furnace were shown.

Keywords: quality of heating, optimal control, energy saving mode, intensification of heating temperature of the process section, underheated billet, thermal conditions, temperature difference, optical pyrometer.

REFERENCES

1. Belenkiy A.M., Dubinskiy M.Yu. et al. *Ustroistvo dlya izmereniya temperatury nagreva obyektov v metallurgicheskikh pechah* [Temperature measuring device for objects heated in metallurgical furnaces]. RF useful model patent No.72061 БН. 2008. No.9.
2. Parsunkin B.N., Panferov V.N. *Kontrol progreva metalla* [Metal preheating control]. Proceedings of Universities Ferrous Metallurgy, 1981, no.10, pp. 127-129.
3. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhima upravleniya nagrevom zagotovok v pechah prohodnogo tipa* [Control mode enhancement of billet heating in through-type furnaces]. Magnitogorsk: Publishing house of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 376 p.

УДК 621.3.02:669.187.28

Агапитов Е.Б., Тихонов А.В.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОГО ТОКОПОДВОДА ПРИ НАГРЕВЕ ШЛАКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА

В статье приведены результаты экспериментального исследования и обоснование применения нагрева шлакометаллического расплава путем электрического нагрева сопротивлением слоя шлака при плазменно-дуговом токоподводе.

Ключевые слова: плазменно-дуговой токоподвод, внепечная обработка, шлак, плазма, сопротивление шлака, скорость плавления, нагрев.

Бурный интерес к низкотемпературной плазме и применению стабилизированных газом струй в отечественной металлургии 70-80-х гг. XX в. снизился в связи со спецификой развития отечественной металлургии, которая в качестве основного направления развития выбрала наращивание производственных мощностей. Попытка заменить электродуговой нагрев и переplав в традиционной электрометаллургии на плазменный постепенно (за исключением дорогостоящей спецэлектрометаллургии) зашла в тупик из-за отсутствия аналогичных по мощности плазмотронов,

дороговизны источников питания, сложности эксплуатации оборудования. Однако развитие процессов внепечной обработки расплавов стали с конца 1980-х годов заставляет по-новому взглянуть на весь спектр внепечных процессов с точки зрения возможности использования в них высокотемпературных струйных электродуговых устройств.

Наличие в ковше агрегата печь – ковш (АПК) готового расплава, который должен пройти обработку, в частности подогрев на 20–70°C, в сложных технологических и временных условиях создает основы для ис-

пользования плазменных устройств ограниченной мощности, работающих в импульсном режиме.

При производстве сверхчистых ультранизкоуглеродистых сталей возможности установок рафинирования с графитовыми электродами по схемам VOD/VAD и ASEA-SKF ограничены из-за проблем конечной десульфурации. Для этого требуется обработка расплава стали высокотемпературным шлаком, который нельзя нагревать с применением графитовых электродов, вследствие неизбежного науглероживания металла. При этом плазменный нагрев создает лучшие условия, поскольку для нагрева используются нерасходуемые водоохлаждаемые электроды или водоохлаждаемый катод и неохлаждаемый анод. Плазменно-дуговой разряд может возбуждаться между плазматронами без электрического контакта с днищем ковша. Так как режим подогрева происходит непродолжительное время, измеряемое минутами, влияние эрозии электродов плазматрона на расплав должно быть незначительным [1].

Опыта применения плазматронов для крупнотоннажных объектов нет и оценить экономическую эффективность этого приема не представляется возможным. При этом проведенные многочисленные исследовательские и опытно-конструкторские работы показали, что использование плазменных нагревателей как простой альтернативы традиционному электродуговому нагреву малоэффективно, а концептуального подхода к стратегии практического использования плазменных устройств в современной отечественной металлургии нет [2].

Однако для внепечной обработки в условиях интенсивного перемешивания шлака с расплавом, особенно в случае использования плазменного нагрева, приём преимущественного нагрева расплава перегретым шлаком может быть технологически оправдан [3].

Перегрев шлака можно осуществлять как теплообменом от плазменной газовой струи, так и за счет нагрева сопротивлением слоя шлака. Последнее осуществляется включением сопротивления шлака в электрическую цепь.

Подвод постоянного тока к слою шлака осуществляется аргоновой плазмой от электродов, подключенных к разным полюсам общего источника постоянного тока (рис. 1, а). В варианте (рис. 1, б) [4, 5] используются две независимые плазменные струи, причем ток нагрева проводника подается на катоды плазматронов. Для организации диффузного токоподвода [6, 7] возможно вакуумирование рабочего пространства (рис. 1, в) при разрежении ($P < 70$ Па).

Для исследования энергетических характеристик нагрева и плавления шлака при плазменно-дуговом токоподводе было проведено экспериментальное исследование, направленное на определение скорости плавления шлака при плазменно-дуговом токоподводе.

Энтальпию шлака, нагретого до температуры расплавления, можно оценить:

$$I_{\text{шл}} = C_{\text{шл}} \cdot t_{\text{шл}}^{\text{пл}}, \quad (1)$$

при $C_{\text{шл}}=0,96$ кДж/кг·°С; $t_{\text{шл}}^{\text{пл}}=1500$ °С; $I_{\text{шл}}=1,44$ МДж/кг.

Энтальпия шлака включает: затраты тепла на нагрев до $t_{\text{пл}}$, скрытую теплоту плавления и затраты теп-

ла на перегрев шлака до заданной температуры. Например, для шлака состава, %: SiO₂=48; FeO=14; CaO=34; Al₂O₃=10 энтальпия $I_{\text{шл}}$ (Дж/г) равна: 695 ($t=700$ °С); 1301 ($t=1300$ °С), для шлака состава, %: SiO₂=50; FeO=20; CaO=20; Al₂O₃=10 энтальпия $I_{\text{шл}}$ (Дж/г) равна: 1645 ($t=1200$ °С); 1815 ($t=1350$ °С).

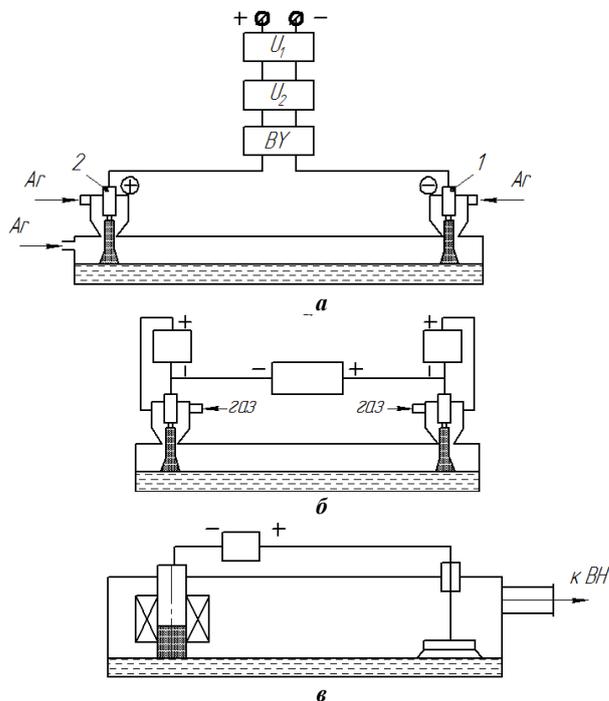


Рис. 1. Схемы вариантов контактно-плазменного нагрева шлака

Электропроводность флюсов для электрошлакового подогрева шлака состава, %: SiO₂=25÷30; Al₂O₃=30÷60; CaO=20÷45; Mg=5÷20; CaF₂=20÷100 составляет $\chi=0,4\div 6$ Ом⁻¹см⁻¹ (при $t=600\div 1900$ °С).

Характер выделения тепла Джоуля (тепла электросопротивления) в шлаке определяется соотношением сопротивлений в объеме шлака и в зоне контакта дуги со шлаком. Если сопротивление дуги (плазмообразующий газ-воздух) или двух дуг значительно больше сопротивления шлака, то основная доля тепловыделения будет приходиться на границу раздела дуга-шлак.

Количество выделившейся теплоты (Дж/с) при прохождении тока через проводник описывается законом Джоуля:

$$Q = I^2 \cdot R, \quad (2)$$

где R – сопротивление проводника; I – ток.

$$R = l / \chi \cdot S = \rho \cdot l / S, \quad (3)$$

где χ – удельная проводимость; $\chi = 1/\rho$ См/м; ρ – удельное сопротивление, Ом·мм²/м; S – площадь сечения проводника; l – длина.

С учетом $U = R \cdot I$ и $P = U \cdot I$ (где U – напряжение, I – ток, P – мощность) зависимость для удельной электропроводности шлака:

$$\chi = \frac{II}{UA}; \quad \chi = \frac{PI}{U^2 A}. \quad (4)$$

Здесь A – эффективная площадь сечения проводника.

С уменьшением χ требуется более высокое напряжение U , если ток I , l и A постоянны.

Истинное сопротивление слоя шлака зависит от его конфигурации (длины, толщины и ширины слоя) и устройства, в котором проводится обработка:

$$R_{ш} = \frac{l}{\chi b h_{ш}}, \quad (5)$$

где χ - удельная электропроводность шлака, $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$; l - длина шлакового слоя; b - ширина слоя; $h_{ш}$ - толщина слоя шлака.

Расчетная зависимость сопротивления шлака от его толщины представлена на рис. 2. По выбранному сопротивлению шлака, при условии, что расплав включен в цепь плазматрона и источника питания последовательно, можно построить совместную вольт-амперную характеристику (рис. 3). Линии постоянных сопротивлений шлака соединяют напряжение холостого хода (U_{xx}) и ток короткого замыкания шлака ($I_{к}$). ВАХ дуги представлены для плазматрона прямой полярности с цилиндрическим катодом. Пунктирная линия ограничивает область устойчивого горения дуги.

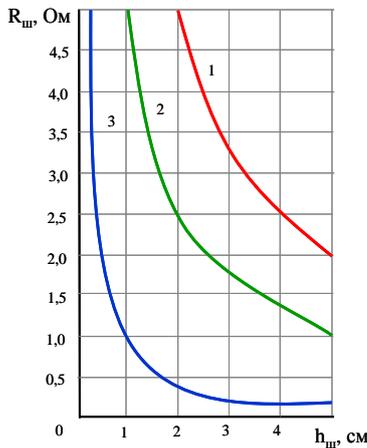


Рис. 2. Изменение сопротивления шлакового слоя от его толщины. Длина шлакового слоя – 50 см; ширина слоя – 10 см; удельная электропроводность χ , $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 5,0

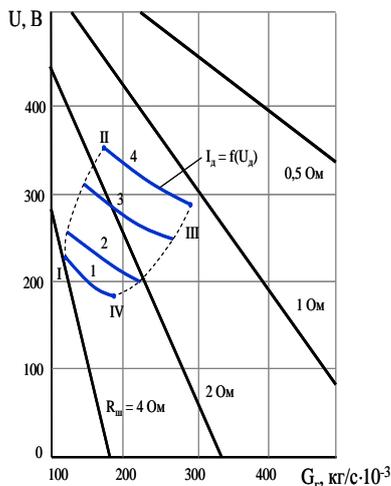


Рис. 3. Совместная ВАХ системы плазматрон – шлак. Расход воздуха на плазматрон G_r , $\text{кг/с}\cdot 10^{-3}$: 1 – 1,0; 2 – 1,3; 3 – 1,7; 4 – 2,2

Рассмотрим несколько схем организации нагрева и плавления шлака с плазматронами (рис. 4). Дуга в

схемах замещения включена последовательно с активным сопротивлением (балластным) $R_б$ и сопротивлением шлака $R_{ш}$. Источником питания схем служит источник постоянного напряжения ($U_{xx} = 670 \text{ В}$). Балластное сопротивление в данном случае обеспечивает создание падающей характеристики напряжения, подведенного к дуге, и ограничивает ток короткого замыкания.

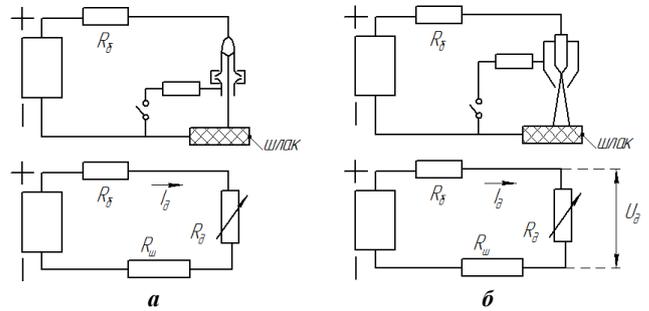


Рис. 4. Схемы установок (и схемы замещения) плазменно-контактного нагрева шлака с одним плазматроном

Для определения скорости плавления шлака при различных вариантах его нагрева исследовались две схемы (рис. 5) [8]:

- а) с воздушным плазматроном косвенного действия прямой полярности и подачи пропана на срез сопла, с наложением «плавающего» потенциала на плавящийся образец;
- б) с нагревом дуговым плазматроном прямой полярности с графитовым катодом, при вихревой стабилизации дуги смесью воздуха и пропана.

На подине из графитовой пластины, установленной под углом 15° , размещался образец массой $m=0,022 \text{ кг}$ по оси плазматрона, на расстоянии $x=0,08 \text{ м}$ от сопла. Расход воздуха на плазматрон составлял $G_r = 1 \text{ г/с}$. Коэффициент избытка воздуха в обоих случаях был одинаковым – $\alpha=0,5$. Мощность, подводимая к плазматронам – $N_{эл}=15\div 25 \text{ кВт}$.

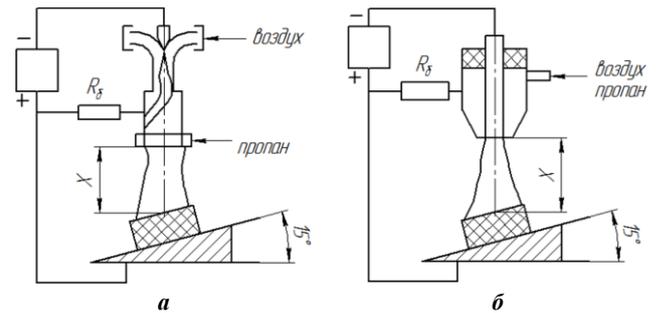


Рис. 5. Схемы плазменного плавления шлака

В обоих случаях инициация разряда начиналась с графитового электрода, с последующим переходом дугового пятна на образец по мере его расплавления. Время проплавления образца модельного шлака до достижения вязкости, обеспечивающей его стекание, фиксировалось секундомером.

Результаты определения скорости плавления шлака представлены на рис. 6. Минимальная толщина расплава на поду, обеспечивающая создание надежной электрической цепи, составляла 30 мм. Нагрев прямой дугой обеспечивал в 3-6 раз более высокую скорость плавления во всем исследованном диапазоне мощностей. Для обеспечения стабильности горения дуги на

образце – приходилось выдерживать соотношение воздух – пропан в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 7.

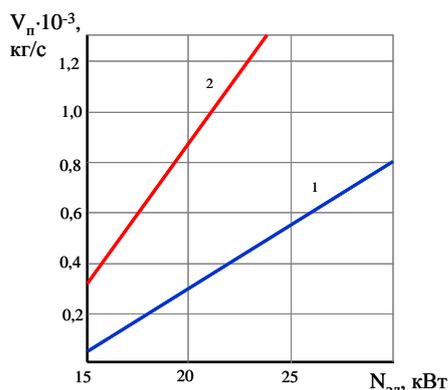


Рис. 6. Изменение скорости плазменного плавления шлака от мощности ЭДУ: 1 – нагрев по схеме (а); 2 – по схеме (б)

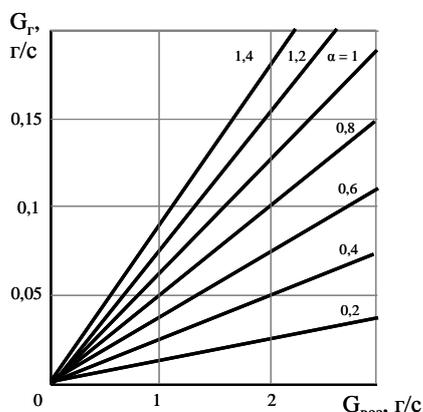


Рис. 7. Связь изменения расхода воздуха от расхода пропана для обеспечения условий стабильности работы ЭДУ

Результаты проведенных экспериментов показали, что стадию расплавления шлака лучше организовывать традиционным дуговым способом, после чего для перегрева шлака можно использовать прием нагрева сопротивлением при плазменном токоподводе.

Авторы намеренно не приводили результаты в относительных единицах, т.к. опыт работы с плазматронами показал, что результаты лабораторных исследований плохо масштабируются и могут использоваться лишь для качественных оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семкин И.Г., Коптев А.П., Морозов А.П. Внепечная плазменная металлургия. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 490 с.
2. Тихонов А.В., Агапитов Е.Б. Способы интенсификации перехода металлического лома в расплав // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы межрегион. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. №71. Т.2. С.103-105.
3. Агапитов Е.Б. Энергосбережение при струйно-плазменной ковшевой обработке расплава стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С.88-90.
4. А.с. 357244 СССР, С21С 7/10. Способ обработки металла.
5. Пат.161111 ВНР, МКИ4 Н01F 3/00 Способ подвода тока для прямого нагрева через контакты из газовой плазмы/Ф.Бали. Опубл.1977
6. Заявка 2151090 Франция, МКИ4 Н05В 3/00 Способ передачи электротока для нагрева детали при контакте с газовой плазмой/ Ф.Бали. Опубл.1973
7. Заявка 1400576 Великобритания, МКИ4 Н05В 3/00 Способ подвода тока к металлической заготовке / Ф.Бали. Опубл.1975.
8. Агапитов Е.Б, Морозов А.П. Плазменно-джоулевый нагрев шлакометаллического расплава при внепечной обработке стали // Тепломассоперенос и свойства жидких металлов: тез. докл. рос. межотраслевой конференции. Обнинск, 29–31 октября 2002 г. Обнинск, 2002. С.212 –214.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY CHARACTERISTICS OF PLASMA-ARC CURRENT LEAD DURING SLAG-METAL MELT HEATING

Agapitov E.B., Tikhonov A.V.

The article presents results of experimental studies and engineering study of a slag melt heating by the slag layer heating with electrical resistance of the in plasma-arc current lead.

Keywords: plasma arc current lead, ladle treatment, slag, plasma, slag resistance, melting rate, heating.

REFERENCES

1. Semkin I.G., Koptev A.P., Morozov A.P. *Vnepechnaya plazmennaya metallurgiya* [Ladle plasma metallurgy]. Magnitogorsk: Nosov MSTU, 2000. 490 p.
2. Tikhonov A.V., Agapitov E.B. *Sposoby intensifikatsii perehoda metallicheskogo loma v rasplav* [Intensification methods of metal scrap transition into the melt]. Current problems of modern science, technology and education. 2013, no.71, vol.2, pp.103-105.
3. Agapitov E.B. *Energoberezhenie pri struino-plazmennoi kovshevoi obrabotke raspлава stali* [Energy saving in

the plasma jet of molten steel ladle treatment]. Herald of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2011. no.4, pp.88-90.

4. AS 357244 USSR S21S 7/10. Metal processing method.
5. Pat.161111 Hungary, MКИ4 N01F 3/00 Method of current supply for direct heating through the contacts from gas plasma. F.Bali. Publ.1977/
6. Application 2151090 France MКИ4 N05V 3/00 Method of electric current transmission for heating parts coming into contact with gas plasma. F.Bali. Publ.1973.
7. Application 1400576 Great Britain MКИ4 N05V 3/00 Method of current supply to the metal workpiece. F.Bali. Publ.1975.
8. Agapitov E.B., Morozov A.P. *Plazmenno-dzhoulevyi nagrev shlakometallicheskogo raspлава pri vnepechnoi obrabotke stali. Teplomassoperenos i svoystva zhidkih metallov*. [Plasma - joule heating of the slag-metal melt during ladle steel processing and Heat and mass transfer properties of liquid metals]. Abstracts of the Russian industrial conference. Obninsk October 29-31, 2002. Obninsk, 2002, pp. 212-214.