

УДК 621.314

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ВАКУУМНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ. СООБЩЕНИЕ 1

Александров А.Г.¹, д. ф.-м. н., профессор, ведущий научный сотрудник (alex7@ipu.ru)

Ливаткин П.А.^{1,2}, мастер по ремонту цеха КИПиА, аспирант

Положенцев К.А.², старший мастер по ремонту цеха КИПиА, аспирант СТИ НИТУ «МИСиС»

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук ИПУ РАН

(117997, Россия, Москва, Профсоюзная ул., д. 65)

ОАО «Металлургический завод «Электросталь»

(144002, Россия, г. Электросталь, Московская обл., ул. Железнодорожная, 1)

Аннотация. В целях изучения возможности снижения затрат на электроэнергию и брака, а так же увеличения качества выплавляемых слитков проведено построение модели управления напряжением вакуумной дуговой печи. Определена цель управления, которая сводится к поддержанию интеграла разности между заданным и фактическим напряжением в допустимых границах, не превышающих заданной величины технологами. В основе предложенной модели управления напряжением вакуумной дуговой печи лежат уравнения напряжения печи, межэлектродного промежутка, перемещения штока-электрододержателя с электродом, двигателя постоянного тока и веса капель. Проведен анализ процесса образования капли. Предложен график и система уравнений, описывающие поэтапный рост образования капли.

Ключевые слова: вакуумная дуговая печь, управление вакуумным дуговым переплавом, управление напряжением, построение модели управления напряжением, уравнения роста капель, электродвигатель постоянного тока, уравнение межэлектродного промежутка.

В настоящее время в металлургической промышленности используется большое количество различных вакуумных дуговых печей (ВДП), в которых разными способами реализовано управление процессом вакуумного дугового переплава.

Вакуумная дуговая печь – электрическая печь для плавки металлов в вакууме энергией электрической дуги [1]. Печь применяется для переплава металла в вакууме для улучшения свойств и чистоты получаемого в процессе переплава слитка. Ее схема представлена на рис. 1.

Печь содержит газоразрядную систему, где электрическая дуга существует на поверхностях переплавляемого металла и на получаемом слитке 2. При подаче постоянного тока между электродом и кристаллизатором возникает электрическая дуга. Выделяющееся тепло расплавляет электрод, жидкий металл стекает в кристаллизатор 5, образуя слиток.

Перемещение штока с электродом осуществляет электродвигатель постоянного тока (ДПТ) через систему редукторов так, чтобы расстояние между электродом и слитком (межэлектродный промежуток) сохранялось постоянным.

Широкое развитие автоматизации технологических процессов в последние годы связано не только с появлением новых средств вычислительной техники, но и современных методов управления. Системы АСУТП вакуумных дуговых печей опираются на различные параметры, которые следует контролировать в процессе всего

переплава. Такими параметрами являются: ток, напряжение внутри печи, давление в вакуумной камере, вес расходоуемого электрода, напряженность магнитного поля, частота капель, скорость переплава и т. д. Существуют разработанные математические модели ВДП [2 – 4].

В работе [2] рассматривается построение математической модели вакуумной печи в целом, математической регрессионной модели ионизации и тепловой модели наплавляемого слитка. Моделирование подтверждается экспериментами, которые позволили получить качественную математическую модель ВДП.

В работе [3] приводится дуговая сталеплавильная печь постоянного тока с разработанной системой регулирования тока, включающей модель электрической дуги. В процессе исследования было установлено, что система нелинейная и приводит к необходимости корректировки настроек ПИД-регулятора при изменении величины задания тока. Чтобы устранить данный недостаток, предложена система с параметрической адаптацией, которая осуществляет автоматическую корректировку коэффициентов регулятора при изменении величины задания тока.

В работе [4] построена имитационная модель дуговой сталеплавильной печи, где для проводимости дуги применяется уравнение Касси [5]. Полученная модель содержит два канала: по току и по напряжению. Сравнение результатов модели с результатами реального объекта показало расхождение в значениях, которое не превысило 10,5 %.

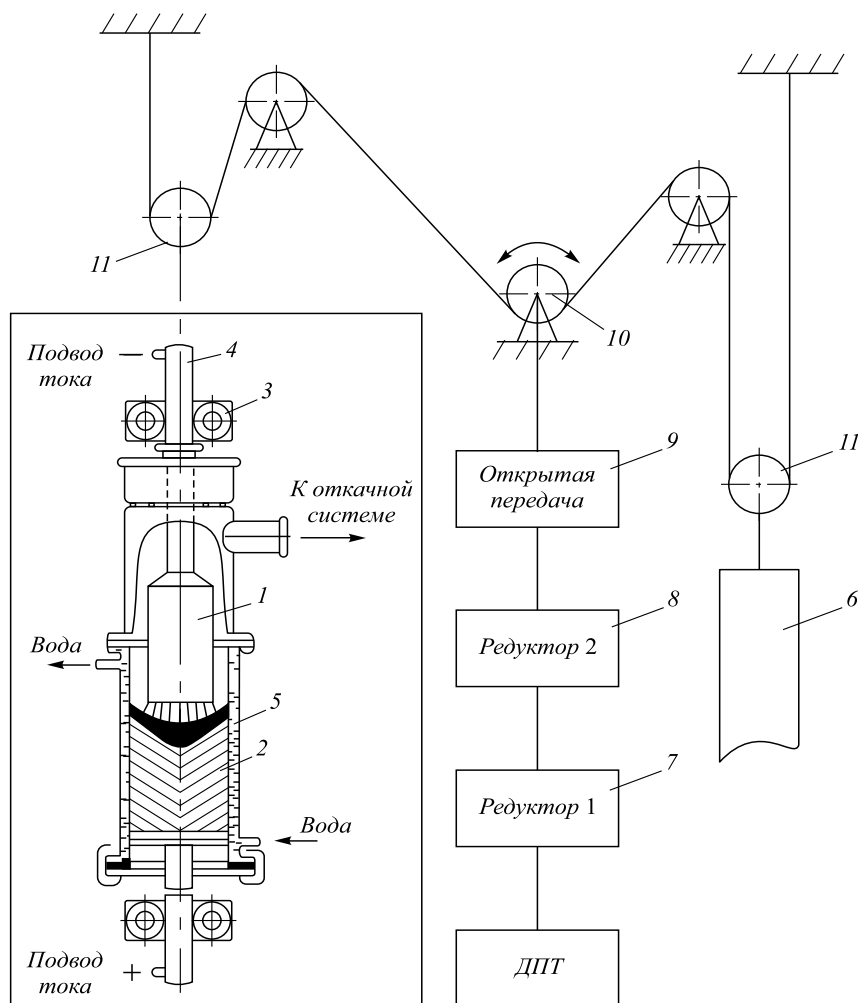


Рис. 1. Схема дуговой вакуумной электропечи с кристаллизатором:

1 – электрод; 2 – слиток; 3 – направляющие штока; 4 – механический шток; 5 – кристаллизатор; 6 – груз; 7 – 9 – система редукторов; 10 – цепная передача; 11 – полиспаст

Fig. 1. Diagram of the vacuum arc furnace with mold:

1 – electrode; 2 – bar; 3 – guide rod; 4 – mechanical rod; 5 – mold; 6 – weighting; 7 – 9 – system of gearboxes; 10 – chain drive; 11 – burton

В настоящей работе предложен метод управления напряжением, где рассматривается разность заданного (u_3) и фактического (u_n) напряжения печи.

Модель процесса управления напряжением вакуумной дуговой печи основывается на поддержании интеграла разности Δu (В) в допустимых границах, не превышающих заданной величины Δu^* (В).

Целью управления является поддержание $\Delta u < \Delta u^*$:

$$\Delta u = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t |u_3 - u_n(t)| dt, \quad T < t, \quad (1)$$

где T – интервал времени усреднения ошибки, с; t – текущее время, с.

Напряжение печи зависит от величины межэлектродного промежутка и падения капель расплава. Они на короткий отрезок времени снижают сопротивление межэлектродного промежутка. Напряжение печи описывается как

$$u_n(t) = i_n R_n(t); \quad (2)$$

$$R_n(t) = l(t) R_{mm} - l_k(t) (R_{mm} - R_k) + R_{эл}, \quad (3)$$

где $l(t)$ – величина межэлектродного промежутка, мм; i_n – ток печи (значение тока на выбранном диапазоне исследования принимается постоянным), А; $R_n(t)$ – сопротивление печи (сопротивление электрода, дуги, слитка), Ом; R_{mm} – сопротивление 1 мм промежутка дуги, Ом/мм; $R_{эл}$ – сопротивление электрода и слитка, Ом; $l_k(t)$ – длина капли расплавленного металла, которая может переключиться межэлектродный промежуток, мм; R_k – сопротивление 1 мм капли, Ом/мм.

Уравнение межэлектродного промежутка:

$$l(t) = S_0 + S(t) - \frac{m_{cl}(t)}{\pi r} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_s^2} \right), \quad r_s(t) = \varphi(l_s), \quad (4)$$

где S_0 – расстояние от электрода до дна кристаллизатора на момент начала переплава, м; $S(t)$ – перемещение электрода с момента начала переплава, м; R – радиус слитка, м; r_3 – радиус электрода (если электрод не цилиндрический, то r_3 является функцией длины электрода $l_3(t)$), м; ρ – плотность электрода, кг/м³; $m_{сл}(t)$ – масса слитка в текущий момент времени, кг.

Перемещение штока-электрододержателя с электродом описывается уравнением

$$\dot{S} = K_p \omega, \quad (5)$$

где K_p – коэффициент передачи редуктора, м; $\omega(t)$ – скорость вращения вала двигателя, рад/с.

Уравнения двигателя постоянного тока [6]:

$$J \dot{\omega} = k_m i_{я} + M_H; \quad (6)$$

$$L_{я} \dot{i}_{я} + r_{я} i_{я} + k_e \omega = u_{я}, \quad (7)$$

где J – приведенный к валу двигателя момент инерции механической системы (электрода, штока и груза), кг·м²; k_m – конструктивная постоянная двигателя, (кг·м²)/(с·А); k_e – конструктивная постоянная двигателя, В·с; $i_{я}$ – ток якоря двигателя, А; $r_{я}$ – сопротивление якоря двигателя, Ом; $L_{я}$ – индуктивность якоря, Гн; M_H – момент нагрузки, кг·м²/с².

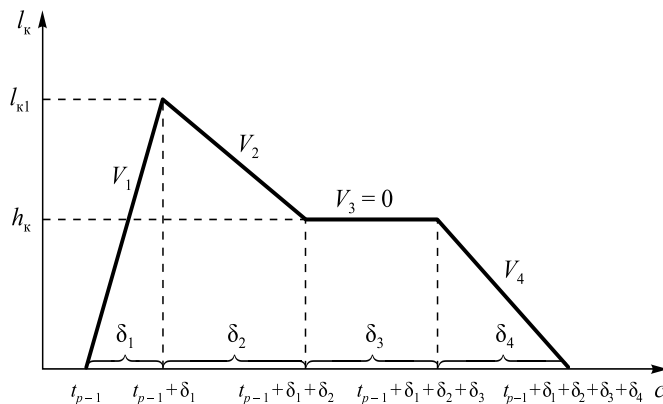


Рис. 2. График образования капли

Fig. 2. The graph of drop formation

Напряжение якорной цепи двигателя формируется выпрямителем:

$$T_B \dot{u}_{я} + u_{я} = k_B u_{ф}; \quad (8)$$

$$T_{ф} \dot{u}_{ф} + u_{ф} = K_{рег} \varepsilon; \quad (9)$$

$$\varepsilon = u_3 - u_{п}, \quad (10)$$

где u_3 – заданное напряжение дуговой печи, В; $u_{п}$ – напряжение печи, В; $u_{ф}$ – сглаженное значение напряжения, В; $T_{ф}$ – постоянная времени сглаживающего фильтра, с; k_B – коэффициент усиления выпрямителя двигателя, T_B – постоянная времени выпрямителя, с.

Пусть капли весом m_i падают равномерно через время τ_i , тогда получаем:

$$m_{сл}(t_p) = \sum_{i=1}^p m_i, \quad t_p = \sum_{i=0}^p \tau_i, \quad p = \overline{1, N}. \quad (11)$$

Рост капли протекает в пять этапов, показан на рис. 2, 3:

- 1) капля образуется на поверхности электрода;
- 2) ножка капли растет со скоростью v_1 в течение времени δ_1 ;
- 3) в момент времени $t_{p-1} + \delta_1$ рвется ножка и капля отрывается и летит к слитку. В течение времени δ_2 ножка сокращается со скоростью v_1 ($v_2 > v_1$) до ее исчезновения (в момент времени $t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2$);
- 4) капля длиной h_k летит к слитку в течение времени δ_3 (δ_3 – время полета капли от момента конца втягивания ножки до момента касания со слитком), так что она в момент времени $t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ касается слитка (на интервале $[t_{p-1} + \delta_1, t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2]$ длина h_k суммируется с длиной уменьшающейся ножки начиная с момента времени $t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2$, когда длина $l_k = h_k$);
- 5) капля входит в слиток в момент времени $t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ со скоростью v_4 в течение времени δ_4 .

Уравнение роста длины капли расплавленного металла:

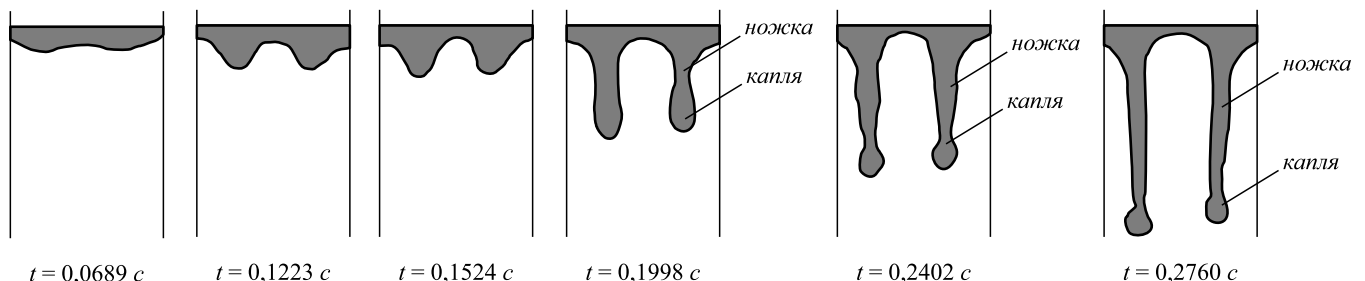


Рис. 3. Процесс образования капель [7]

Fig. 3. The process of drops formation [7]

$$l_k(t) = \begin{cases} v_1(t - t_{p-1}), & t_{p-1} \leq t \leq t_{p-1} + \delta_1, l_{k1} = v_1\delta_1; \\ l_{k1} - v_2(t - (t_{p-1} + \delta_1)), & t_{p-1} + \delta_1 \leq t \leq t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2; \\ l_{k1} - v_2\delta_2 = h_k, v_2\delta_2 = l_{k1} - h_k; & h_k, \\ t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2 \leq t \leq t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, v_3 = 0; & h_k - v_4(t - (t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3)), \\ t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \leq t \leq t_{p-1} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4; & v_4\delta_4 = h_k, \end{cases} \quad (12)$$

где t_{p-1} – момент начала образования p -й капли, с; l_{k1} – максимальная длина капли расплавленного металла, которая может переключить межэлектродный промежуток, м.

Выводы. Разработана модель процесса управления вакуумной дуговой печью. Выведено уравнение роста длины капли расплавленного металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лапшин И.В. Автоматизация дуговых печей. – М.: Изд. МГУ, 2004. – 165 с.
2. Ташкинов А.Ю. Разработка математических моделей и алгоритмов и их применение для исследования и усовершенствования процессов вакуумного дугового переплава: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2003. – 21 с.
3. Нехамин И.С. Разработка системы управления дуговой печью постоянного тока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 20 с.
4. Фомин А.В. Построение имитационной модели дуговой сталеплавильной печи // Изв. тульского госуд. университета. Техн. науки. 2009. № 3. С. 315 – 321.
5. Cassie A.M. A new Theory of Arc Rupture and Circuit Severity // CIGRE. 1939. № 102. P. 1 – 14.
6. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
7. Zanner F.J., Williamson R.L., Harrison R.P. etc. Superalloy 718 – Metallurgy and Applications / Edited by E.A. Loria. The Minerals, Metals & Materials Society, 1989. P. 17 – 32.

Поступила 6 ноября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 3, pp. 203–206.

CREATING A MODEL OF VOLTAGE CONTROL IN VACUUM ARC FURNACE. REPORT 1

Aleksandrov A.G.¹, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Leading Researcher (alex7@ipu.ru)

Livatkin P.A.^{1,2}, Master of Shop Repairing, Postgraduate
Polozhentsev K.A.², Leading Master of Shop Repairing, Postgraduate of STI MISiS

¹ V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (65, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia)

² JSC “Metallurgical Plant” Electrostal” (1, Zheleznodorozhnaya str., Elektrostal, Moscow Region, 144002, Russia)

Abstract. In order to explore the possibility of reducing energy costs and defects, as well as to increase the quality of melted ingots, the authors held the model of voltage control in vacuum arc furnace. The control objective was determined, which is to maintain the integral of the difference between the desired and the actual voltage in the range, not exceeding the value predetermined by technologists. The basis of the proposed model of voltage control in the vacuum arc furnace was based on the voltage equations of: furnace, electrode gap, displacement of rod-electrode to electrode, the DC motor and the drops weight. The formation of droplets was analyzed. The schedule and system of equations describing the gradual formation of droplets was proposed.

Keywords: vacuum arc furnace, control of vacuum arc remelting, voltage control, construction of a model of voltage control, equations of droplet growth, DC motor, the equation of the electrode gap.

REFERENCES

1. Lapshin I.V. *Avtomatizatsiya dugovykh pechei* [Automation of arc furnaces]. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 2004, 165 p. (In Russ.).
2. Tashkinov A.Yu. *Razrabotka matematicheskikh modelei i algoritmov i ikh primeneniye dlya issledovaniya i usovershenstvovaniya protsessov vakuumnogo dugovogo pereplava: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development of mathematical models and algorithms and their application to research and process improvement of vacuum arc remelting. Cand. Tech. Sci. diss.]. Ekaterinburg: 2003, 21 p. (In Russ.).
3. Nekhamin I.S. *Razrabotka sistemy upravleniya dugovoi pech'yu postoyannogo toka: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development of control system of the arc furnace DC. Cand. Tech. Sci. diss.]. Moscow: 2009, 20 p. (In Russ.).
4. Fomin A.V. Creating a simulation model of the electric arc furnace. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2009, no. 3, pp. 315–321. (In Russ.).
5. Cassie A.M. A new Theory of Arc Rupture and Circuit Severity. *CIGRE*, 1939, no. 102, pp. 1–14.
6. Mikhailov O.P. *Avtomatizirovannyi elektroprivod stankov i promyshlennykh robotov* [Automated electric drive of machines and industrial robots]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 304 p. (In Russ.).
7. Zanner F.J., Williamson R.L., Harrison R.P., Flanders H.D., Thompson R.D. and Szeto W.C. Superalloy 718 – Metallurgy and Applications Edited by Loria E.A., *The Minerals, Metals & Materials Society*, 1989, pp. 17–32.

Received November 6, 2014