

УДК 620.19

Г. Н. Ахобадзе

Институт проблем управления РАН,

г. Москва

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ПРОМЕЖУТКА В ВАКУУМНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

Предлагается принцип измерения длины межэлектродного промежутка в вакуумной дуговой печи, предусматривающий использование резонансной частоты открытого резонатора, образованного торцом плавящегося электрода со сквозным отверстием и ванной жидкого металла в кристаллизаторе. Исследуется влияние ионизированного пара на характеристики распространения электромагнитных волн между отражателями резонатора. Анализируется условие распространения волны, с учетом диэлектрической проницаемости ионизированного пара в зависимости от его собственной частоты и частоты, используемой электромагнитной волной. Приводятся результаты оценки абсолютной и относительной погрешностей измерения контролируемого параметра.

Ключевые слова: частота, открытый резонатор, отражатель, ионизированный пар, диэлектрическая проницаемость, точность, длина.

G. N. Akhobadze

MEASURING LENGTH OF INTERELECTRODE GAP IN VACUUM ARC FURNACE

The paper is devoted to a principle for measuring length of interelectrode gap in a vacuum arc furnace with a resonant frequency of an open resonator formed by a melting electrode with a through hole and a bath of liquid metal in a crystallizer. The influence of ionized steam on characteristics of propagation of electromagnetic waves between cavity reflectors is examined. Conditions of wave propagation with account of dielectric permittivity of the ionized steam depending on its frequency and frequency of the electromagnetic wave are analyzed. Results of the estimates of absolute and relative errors in measurements of the controlled parameters are demonstrated.

Keywords: frequency, open resonator, reflector, ionized steam, dielectric permittivity, accuracy, length.

Для стабилизации процесса переплава сплавов в вакуумной дуговой печи важным параметром является регулирование длины межэлектродного промежутка в вакуумной дуговой печи.

Существование проблемы связано с тем, что длину дуги необходимо поддерживать в определенном (оптимальном) интервале, например, в пределах 11–14 мм. При длине дуги меньше 11 мм или при длине дуги больше 14 мм возможно возникновение дефектов в слитке и других нежелательных технологических последствий.

В докладе на основе использования резонансной частоты открытого резонатора предлагается принцип измерения длины межэлектродного промежутка (длины дуги).

Данный принцип предусматривает возбуждение электромагнитных колебаний в открытом резонаторе, образованном торцом плавящегося (расходуемого) электрода со сквозным отверстием и ванной жидкого металла в кристаллизаторе, и измерение резонансной частоты (или добротности) открытого резонатора связанной с контролируемым параметром.

Открытый резонатор, как правило, состоит из двух вогнутых (плоских) отражателей или одного плоского отражателя и одного вогнутого отражателя. Технологический процесс переплава жаропрочных сплавов в вакуумной дуговой печи показывает, что форма торца расходуемого электрода ближе к плоской поверхности, а форма ванны жидкого металла – к вогнутой поверхности. В силу этого можно принимать торец расходуемого электрода в качестве плоского отражателя открытого резонатора, а ванну жидкого металла – вогнутого отражателя открытого резонатора. В рассматриваемом случае для ввода электромагнитного сигнала в полость данного открытого резонатора и вывода электромагнитного сигнала из полости открытого резонатора, расходуемый электрод должен иметь сквозное отверстие, диаметр которого, подбирается с учетом длины электромагнитной волны, используемой для возбуждения открытого резонатора.

Выходным электромагнитным сигналом микроволнового генератора (см. рис. 1) возбуждают электромагнитные колебания в данном открытом резонаторе.

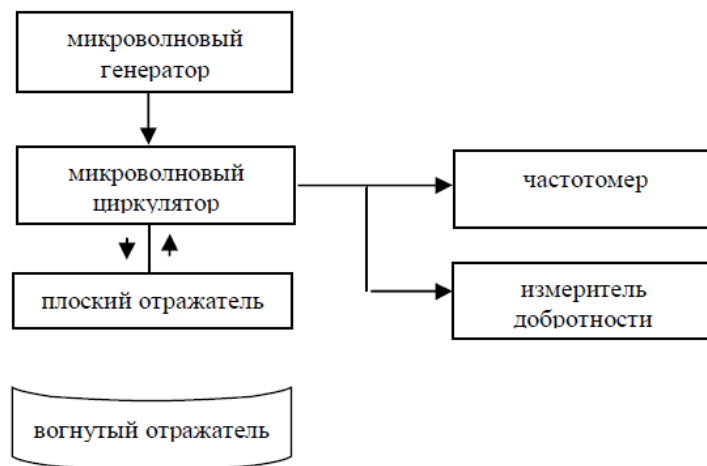


Рис. 1. Функциональная схема измерения длины межэлектродного промежутка

Для собственной резонансной частоты (круговой) ω рассматриваемого открытого резонатора можно записать

$$\omega = \frac{\pi qc}{2l} . \quad (1)$$

где q – целое число (практически $q > 3$), c – скорость распространения электромагнитной волны между отражателями (свободное пространство), l – расстояние между вогнутым (ванной жидкого металла) и плоским (торцом расходуемого электрода) отражателями открытого резонатора. Принимая во внимание то, что в процессе переплава жаропрочных сплавов оптимальная (допустимая) длина межэлектродного промежутка может колебаться в пределах 11–14 мм, принимаем расстояние l , равное 12,5 мм, т. е. среднее значение допустимой длины межэлектродного промежутка. В силу этого обозначим эту длину l_{cp} , тогда формулу (1) можно переписать как

$$\omega = \frac{\pi qc}{2l_{cp}} . \quad (2)$$

Из последней формулы видно, что при постоянных значениях q и c , измерением резонансной частоты данного открытого резонатора можно рассчитать изменение длины межэлектродного промежутка.

От выбора длины волны, распространяющейся между отражателями, зависит диаметр сквозного отверстия в расходуемом электроде. При частоте,

например, 34 ГГц электромагнитных колебаний, возбужденных в данном открытом резонаторе, диаметр сквозного отверстия по принципу критической частоты круглых волноводов, должен составить не более 8 мм.

Проиллюстрируем изменение резонансной частоты открытого резонатора при изменении длины межэлектродного промежутка в пределах 10–15 мм. При $q = 10$ и $c = 3 \cdot 10^8$ м/сек, резонансная частота открытого резонатора может изменяться от 7,5 до 5 мГц.

Как показывает практика, при переплаве, межэлектродный промежуток заполняется ионизированным паром, например, алюминия, который может оказать влияние на характеристики распространения электромагнитной волны между отражателями. К основным параметрам ионизированного газа, оказывающим непосредственное влияние на характеристики распространения электромагнитных волн, можно отнести диэлектрическую и магнитную проницаемости данной среды. При этом магнитную проницаемость этого пара μ_{II} можно принимать равной единице (случай вакуума).

Как известно, диэлектрическая проницаемость ионизированного газа ε отличается от единицы, и она может быть выражена как

$$\varepsilon = \frac{1 - 80,8N_e}{f^2},$$

где N_e – электронная плотность, см^{-3} , f – используемая частота электромагнитной волны. Приведенную формулу можно использовать для оценки условий распространения электромагнитных волн между отражателями. В данном случае условием затухания (нераспространения) волны может являться то значение диэлектрической проницаемости ионизированного газа, которое меньше нуля. Это вытекает из того факта, что при значительной величине электронной плотности, собственная частота ионизированного газа ($f_0 = 80,8N_e$) должна быть больше используемой частоты f (коэффициент преломления имеет мнимую величину). В соответствии с этим для диэлектрической проницаемости ионизированного пара ε_{II} можно принимать

$$\epsilon_n = 1 - \frac{f_0^2}{f^2},$$

где f_0 – собственная частота ионизированного пара.

Последнее выражение дает возможность оценить условие распространения электромагнитных волн между отражателями открытого резонатора при наличии между ними ионизированного газа. В силу того, что диэлектрическая проницаемость ионизированного пара ϵ_n меньше единицы и зависит от частоты колебаний, данный газ можно отнести к диспергирующим средам с фазовой и групповой скоростями распространения электромагнитных волн. При этом для фазовой скорости волны в данном ионизированном газе без учета потерь можно принимать

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{f_0^2}{f^2}}}.$$

Используя связь фазовой скорости волны с групповой скоростью ($v_\phi v_{gp} = c$), для групповой скорости волны в ионизированном газе можно записать

$$v_{gp} = \frac{c}{\sqrt{\frac{f_0^2}{f^2}}}.$$

Из последних выражений видно, что в случае приближения рабочей частоты к собственной частоте ионизированного газа групповая скорость уменьшается, а фазовая скорость возрастает. Кроме того, эти выкладки дают объяснение к возможному искажению сигнала в данной диспергирующей среде (гармонические составляющие сигнала распространяются с разными фазовыми скоростями, а максимумы огибающей сигнала с разными групповыми скоростями).

В рассматриваемом случае ввиду малого расстояния между отражателями данного открытого резонатора, можно допускать отсутствие поглощения электромагнитных волн.

Учитывая то, что данное измерение длины межэлектродного промежутка является косвенным методом измерения, здесь необходимо оценить точность (погрешность) этого вида измерения. При использовании формул (1) и (2) для вычисления длины межэлектродного промежутка, источниками погрешностей могут являться: класс точности измерителя добротности (или частотомера), внутреннее сопротивление микроволнового генератора и высокая температура в кристаллизаторе. Из этих погрешностей наиболее существенной является погрешность, связанная с температурой в кристаллизаторе. Это объясняется тем, что из-за влияния температуры возможны изменения геометрических (линейных) размеров отражателей. Для оценки температурной погрешности из-за изменения геометрических размеров отражателей, приводящего к изменению собственной резонансной частоты резонатора, необходимо знать коэффициент линейного расширения материала резонатора. Пусть материалом переplava (резонатора) является алюминий. Тогда с учетом того, что коэффициент линейного расширения алюминия $\alpha = 2,7 \cdot 10^{-5}$, для изменения резонансной частоты резонатора из-за изменения температуры можно использовать выражение

$$\Delta f = f\alpha t(1 - at),$$

где Δf – изменение резонансной частоты, t – температура. При рабочей частоте $f = 10$ ГГц изменение Δf на один градус изменения температуры резонатора может составить $27 \cdot 10^4$ Гц. При более высоких частотах, например, $f = 34$ ГГц изменение резонансной частоты на один градус изменения температуры резонатора составляет $91,8 \cdot 10^4$ Гц. Из этого примера видно, что при переplаве материалов с небольшими коэффициентами теплового расширения и частотах сантиметрового диапазона волн, температурные погрешности окажутся незначительными.

В рассматриваемом случае для теоретической оценки погрешности результата косвенного измерения используем детерминированный подход (наиболее распространенный в технических измерениях). При выполнении всех допущений, необходимых для рассмотрения этого подхода, функциональную

зависимость длины межэлектродного промежутка L от резонансной частоты F в общем случае можно представить как

$$L = P(F_1, F_2, \dots, F_n),$$

где F_1, F_2, \dots, F_n – исходные величины измеряемой величины (частоты). Пусть предельные значения абсолютных погрешностей Δ_i определения каждой исходной величины F_i известны. Тогда предельное значение абсолютной погрешности Δ_l результата измерения искомой величины L в общем виде можно определить по формуле накопления частных погрешностей:

$$\Delta_l = \sqrt{\sum_i^n (dP / dF_i \Delta_i)^2},$$

где dP/dF_i – частные производные функционала P по каждой исходной величине в точках, соответствующих найденным значениям величин F_i ; Δ_i – предельные значения абсолютных погрешностей определения исходных величин F_i . Отсюда можно заключить, что при известном виде функциональной зависимости P можно вычислить предельные значения абсолютной Δ_l и относительной δ_l погрешностей определения исходных величин.