

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ СЫРЬЯ СЛОЖНОГО СОСТАВА В ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАЗМЕ**

**О.Т. Данилова**

High-frequency induction plasma characteristics have been investigated by flow visualisation technique with high-speed camera shooting. The heating process of heterogeneous particles injected into a plasma jet is analysed.

Данная работа проводилась с целью разработки основ плазменной технологии и оборудования для получения порошков оксидов металлов из отходов систем промышленной водоподготовки в плазме высокочастотного индукционного разряда. Отличительной чертой такой технологии является способность воспринять в качестве сырья материал, находящийся в состоянии порошка, или рационально трансформировать в порошкообразную форму сырье, находящееся в недиспергированном состоянии. Кроме того, эта технология позволяет производить разложение любых опасных примесей без выброса в атмосферу, является безреагентной, позволяет устранить такие широко распространенные переделы, как нейтрализация, осаждение, сушка, прокалка, солевой сброс.

Плазменное выделение УДП оксидов металлов состоит из следующих стадий:

- 1) генерация плазмы необходимого состава в требуемом диапазоне температур и давлений;
- 2) ввод реагентов — веществ в твердом или жидком состояниях и обеспечение необходимого времени их контакта с плазмой;
- 3) вывод целевого продукта из зоны реакции.

Основным элементом любой плазменной установки является источник питания — высокочастотный генератор, в котором происходит преобразование тока промышленной частоты в ток высокой частоты, используемый для питания индуктора плазмотрона. Второй элемент — плазмотрон, основным назначением которого является оптимальное поглощение колебательной мощности ВЧ-генератора с минимальными потерями. Таким образом, для определения оптимальных режимов технологического процесса следует рассчитать параметры ВЧИ-разряда с целью определения способов управления его температурой и обозначить конструктивные изменения ВЧ-генератора.

Для представления модели технологического процесса был выбран нескинированный (с толщиной скин-слоя  $> 0,5 R_0$ ) высокочастотный индукционный (ВЧИ) разряд контрагированной формы с температурой плазмы более низкой, чем в используемом обычно скинированном разряде. Контрагированный разряд более технологичен, так как наряду с возможностью повышения эффективности его использования за счет понижения температуры он позволяет значительно повысить ресурс работы реактора из-за меньших тепловых нагрузок на стенки камеры, а геометрия плазмы в нем удобна для проведения плазмохимических процессов непосредственно в зоне генерации плазмы.

Температура ВЧИ-разряда для заданного диапазона температур определяется из условия баланса энергий [1]: выделяемой за счет поглощения плазмой электромагнитной энергии  $S_0$  и отводимой теплопроводностью  $W$ . Для случая большого скин-слоя  $S_0$  и  $W$  определяются выражениями:

$$S_0 = \frac{4\pi\sigma f^2 r^2 (I_0 n)^2}{c^2},$$

$$W = \frac{8\pi\lambda k T^2}{eU},$$

где  $f$  – частота ВЧ-поля;  $\sigma$  – электропроводность плазмы;  $I_0$  – число ампер-витков на единицу длины индуктора;  $r$  – радиус разряда;  $\lambda$  – теплопроводность

Расчеты показывают, что в режиме генерации ВЧИ-разряда с большой глубиной скин-слоя возможны температуры от 3400 К до 6700 К. Однако при таких температурах для эффективного поглощения мощности ВЧ-генератора нужно увеличивать объем разряда, чего можно добиться, применяя длинный индуктор. Разряд в этом случае должен вытягиваться и переходить в контрагированную форму. Для поддержания такого нескинированного разряда необходимо решить две задачи:

- 1) найти способ стабилизации разряда в неустойчивом состоянии;
- 2) согласовать ВЧ-генератор с достаточно длинным индуктором, позволяющим получать разряд в контрагированной форме и вкладывать в него большие энергии.

Работа ВЧ-генератора на такую нагрузку, как плазма, предъявляет к устройству ряд специфических требований:

- в генераторах должна быть предусмотрена широкая регулировочная характеристика, обеспечивающая изменение мощности от номинальной почти до нуля;
- необходимо обеспечение устойчивой работы в режиме холостого хода (т.е. до возбуждения разряда) и автоматическое получение заданного режима после его возбуждения;
- для целого ряда случаев требуется получение значительной напряженности магнитного поля в заданном диапазоне температур;
- генераторы должны удовлетворять требованиям стабильности частоты в пределах разрешенных узких радиоканалов.

Выполнение перечисленных требований обеспечивается выбором схемы высокочастотной части автогенератора. В настоящей работе исследовались режимы генераторов, работающие с самовозбуждением, мощностью 40 и 60 кВт и рабочими частотами 0,44; 5,28; 13,56 МГц.

Расчет частоты генерации основывается на выполнении двух критериев:

- условие баланса фаз;
- условие баланса амплитуд:  $K\beta \geq 1$ , где  $K$  – коэффициент усиления,  $a\beta$  – коэффициент обратной связи.

Первое условие сводится к выполнению соотношения

$$Z_{ak} + Z_{ag} + Z_{gk} = 0,$$

где  $Z_{ak}$ ,  $Z_{ag}$ ,  $Z_{gk}$  – соответственно комплексные сопротивления, действующие на участках анод-катод, анод-сетка и сетка-катод.

Условие баланса амплитуд фактически означает, что  $\beta > 1$ , так как обычно  $K \gg 1$ . С учетом этого условие баланса может быть записано как

$$\frac{Z_{gk}}{Z_{ak}} > 0.$$

Алгоритм расчета ВЧ-генератора на заданную рабочую частоту сводится к следующему:

- 1) задаются реактивные сопротивления элементов схемы ВЧ-генератора;
- 2) рассчитываются частота генерации и коэффициент обратной связи;
- 3) корректируются значения реактивных сопротивлений для получения требуемой частоты;
- 4) по результатам расчета вносятся изменения в конструкцию генератора.

Поскольку при корректировке значений реактивных сопротивлений имеется некоторый произвол, в ходе расчета и настройки генератора учитывались требования, вытекающие из анализа результатов численного моделирования ВЧИ-разряда. Суть этих требований заключается в следующем. Для получения устойчивого режима генерации нескинированного разряда необходимо обеспечить поглощение подводимой ВЧ-мощности областью относительно прозрачной для ВЧ-поля плазмы. А это возможно лишь за счет увеличения объема этой области, т.е. при фиксированном радиусе разрядной камеры – за счет увеличения длины плазменного столба. Следовательно, необходимо увеличивать длину индуктора, а значит, и его индуктивность. Поэтому критерием, устраняющим произвол в выборе реактивных сопротивлений, является условие максимального значения индуктивности анодного контура автогенератора. В таблице 1 приведены результаты расчетов параметров эквивалентных схем ВЧ-генераторов с разными рабочими частотами.

Исследования режимов схем генераторов показали устойчивость генерации, возможность изменения выходной мощности и напряжения на индукторе за счет регулирования коэффициента обратной связи путем изменения емкости  $C_{oc}$ .

Идентификация исходного сырья методом рентгеноспектрального анализа выявила присутствие в шламе до 46 процентов  $Fe(OH)_3$ , не имеющей кристаллической структуры, а также наличие оксидов  $Si$ ,  $Ti$ ,  $Ca$ ,  $K$  и др.

Таблица 1.

Мгц	$K_{oc}$	$L_a$	$L_{oc}$	$L_e$	$C_a$	$C_{ca}$	$C_{oc}$
0,44	-	55	80	14	2200	65	1500
5,28	0,15	6,5	2.2	-	65	65	2200
13,56	1,7	1,3	1	-	30	65	200

Термодинамический анализ полученных данных показал, что для системы шлам - плазма конденсация оксидов железа наблюдается при температуре  $\sim 3000K$ , в интервале температур  $2200 - 3000K$  основной конденсированной фазой является  $FeO$ . При температурах ниже  $2200K$  образуются конденсированные фазы  $Fe_2O_3$  и  $Fe_3O_4$ . Очевидно, что для получения порошков оксидов в ультрадисперсном виде реагенты необходимо нагревать до температуры  $3000 - 4000K$ , а закалку производить при температуре  $2000K$ .

При обработке дисперсных материалов в плазменных струях возникает проблема нагрева частиц, объединяющих в своем объеме два или несколько веществ с различными теплофизическими свойствами. Нагрев частиц сырья из целевых продуктов в общем случае является нестационарным тепловым процессом и включает две стадии передачи тепла: конвективной теплоотдачи от газовой фазы к поверхности частицы и передачи тепла от поверхности частицы к ее центру путем нестационарной теплопроводности. Условие расплавления частиц исходного материала в модели определяется из ряда обычных допущений [2], а также на основании имеющихся расчетных и экспериментальных данных, что нагрев и разгон частиц происходит на начальном участке струи [2]:

$$\frac{T_g \lambda_g^2}{\mu_g (1+r)(1+\alpha) v_g} \geq \frac{d_p^2 D}{1092 N u^2 \pi R_0^2 (l_k + 6(R_0 - R))},$$

где  $T_g$  – это температура плазмообразующего газа (ПГ);  
 $\lambda_g$  – теплопроводность ПГ;  
 $\mu_g$  – коэффициент кинематической вязкости;  
 $v_g$  – расход ПГ;  
 $r$  – степень ионизации ПГ;  
 $\alpha$  – степень диссоциации ПГ;  
 $d_p$  – диаметр частицы;  
 $l_k$  – расстояние от места подачи порошка до среза сопла;  
 $R_0$  – радиус сопла плазматрона;  
 $R$  – расстояние от оси трубки до траектории движения частицы;  
 $D$  – константа, зависящая от комплекса теплофизических свойств частицы, как-то, характер компонентов и их соотношения.

Для оценки минимальной электрической мощности плазматрона, необходимой для полного расплавления материала частицы в плазменной струе, используется аппроксимирующее выражение:

Таблица 2.

Вещество	Исходное сырье	Целевой продукт
$Fe(OH)_3$	46%	-
$Fe_2O_3$	-	25%
$Fe_3O_4$	-	49%
$SiO_2$	20%	3%
$TiO_2$	1,5%	1,2%
$CaO$	2,5%	2%
$K_2O$	7%	3%
$MgO$	8%	4%
$Na_2O$	5%	3%

$$P = 2,99 \frac{v_g^{1,5} d_p D^{0,5}}{\eta R^{1,25} (l_k + 6(R_0 - R))^{0,6}},$$

где  $\eta$  –тепловой к.п.д. плазмотрона.

Согласно расчетам, время полного расплавления исходных частиц по всему объему происходит за времена порядка  $10^{-3} - 10^{-4} c$ . Полученные плазмохимическим способом порошки представляют собой субмикронные частицы, имеющие сферическую или сфероидальную форму, особенно характерную для процессов с принудительным быстрым охлаждением продукта, когда скорость фазового перехода происходит очень быстро и частицы не успевают принять характерную для кристаллического состояния форму. В таблице 2 представлены результаты элементного анализа в условных процентах исходного сырья и целевого продукта.

Полученные данные хорошо согласуются с результатами термодинамического расчета. Содержание различных примесей объясняется присутствием последних в конденсированной фазе при температуре закалки  $\sim 2200 K$ . Таким образом, можно сделать вывод, что применение в ресурсосберегающих технологиях по переработке металлсодержащих отходов плазмохимического способа позволяет получать порошки на основе оксидов металлов в ультрадисперсной форме, причем модельные представления процесса хорошо согласуются с экспериментальными данными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. М.:Наука, 1987.
2. Юшков В.И., Борисов Ю.С. // *Труды УралНИИ Чермет*. 1971. Т.2. С.301