

ПЛАВКА РАДИОАКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ В ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Э.Н. Шингарев, Г.Ш. Баторшин, Б.И. Рябов,
Ю.В. Нежелский, С.А. Огурцов

Традиционно для плавки и литья радиоактивных металлов используются вакуумные индукционные печи. Проведение плавки в такой печи, наряду с проблемами наличия водоохлаждаемого индуктора внутри вакуумируемого объема, замены и утилизации отработавших элементов, приводит к появлению технологических сложностей, связанных с необходимостью одновременного создания равномерного температурного поля в зонах плавки и нагрева изложницы, а также - температурного градиента между этими зонами. В индукционной печи добиться высокой и стабильной равномерности температурного поля представляется крайне сложной задачей, так как отсутствует инструментарий, позволяющий влиять на деформацию температурного поля, в связи с чем возникает необходимость перегрева металла. Между тем, для урана, например, [2] перегрев расплава на 100 °С приводит к увеличению усадки на 15-20 %.

При проведении плавки радиоактивных металлов в графитовых тиглях в индукционных вакуумных электропечах нагрев, в основном, происходит не за счет индуцируемого тока в нагреваемом металле, а путем нагрева графитовой оснастки с последующей теплопередачей.

Условная толщина токонесущего слоя (глубина проникновения) в графитовой оснастке составляет [1]:

$$\Delta = (\rho / \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu)^{0,5}, \quad (1)$$

где ρ – удельное электросопротивление, Ом·м; f – частота тока, Гц; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость.

Таким образом, при толщине графитовой оснастки более ~30–40 мм при индукционном нагреве плавление металла происходит за счет разогрева графита и перемешивание расплавленного металла если и происходит, то только за счет неравномерности температурного поля.

Альтернативой индукционной печи, по нашему мнению, может быть печь сопротивления, в которой поддержание равномерности температурного поля относительно легко организуется высокой степенью повторяемости параметров резистивного нагрева, а также возможностью применения нескольких зон нагрева.

До сих пор, несмотря на очевидные преимущества, связанные с высокой равномерностью температурного поля, возможностью стабильного воспроизведения результатов, а также исключением водоохлаждаемого индуктора из вакуумируемого объема, «способ плавки в печах сопротивле-

ния не нашел промышленного применения из-за ... отсутствия требуемой надежности» [2]. Основное ограничение «требуемой надежности» обусловлено низкой стойкостью нагревательных элементов, изготовленных из тугоплавких металлов (Mo, W), при повышенных температурах.

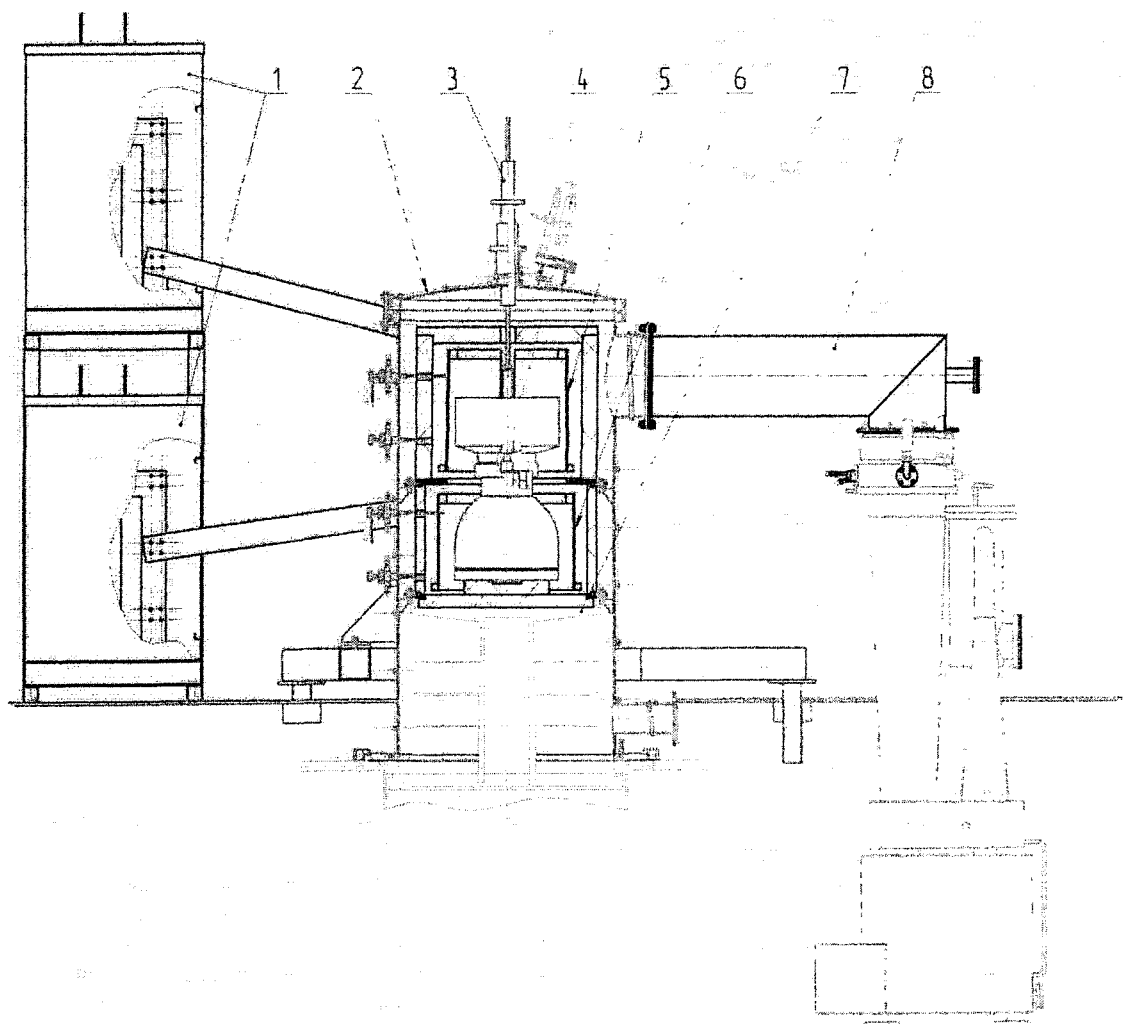
В настоящее время для вакуумных печей с максимальной рабочей температурой до 2200 °С проблема надежности может быть решена применением в качестве нагревательных элементов углерод – углеродного композиционного материала (УУКМ). Как и любой углеродный материал, УУКМ обуславливает рост прочностных характеристик и уменьшение удельного электросопротивления с повышением температуры. Так для УУКМ с плотностью 1400–1450 кг/м³ прочность на сжатие составляет 100–130 МПа, прочность на изгиб 190–250 МПа, удельное электросопротивление изменяется с 40–60 мкОм·м при комнатной температуре до 10–20 мкОм·м при 2000 °С.

Для плавки специальных сплавов нами применена вакуумная печь сопротивления, нагревательный блок которой был изготовлен из УУКМ. На рисунке представлена схема этой печи. На рисунке указаны следующие конструктивные элементы печи: 1 – понижающие печные трансформаторы плавильного и нагревательного блоков; 2 – верхняя крышка; 3 – погружная термопара со стопором; 4 – пирометр; 5 – нагреватель, окруженный теплоизоляцией, в плавильном блоке; 6 – нагреватель, окруженный теплоизоляцией, в нагревательном блоке (блоке подогрева литейной формы); 7 – загрузочный стол; 8 – вакуумная система.

Нагреватель (поз. 5 – верхний плавильный блок, поз. 6 – нижний нагревательный блок) изготовлен из УУКМ плотностью 1400–1450 кг/м, теплоизоляция – из УУКМ плотностью 150–250 кг/м. Нагреватели – с независимой регулировкой температуры. Теплоизоляционный материал имеет значения коэффициента теплопроводности, представленные в таблице. При распределенной нагрузке в 4–5 кПа и температуре 2200 °С заметная усадка теплоизоляции не была обнаружена.

Значения коэффициента теплопроводности
в зависимости от температуры

Температура, К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
300	0,05–0,20
1200	0,15–0,30
2200	0,30–0,45



Вакуумная электрическая литейная установка ВЭЛУ-80-75-16

Коэффициент теплопроводности позволяет оценить необходимую толщину теплоизоляции, обеспечивающую оптимальное сочетание тепловых потерь и возможность в широких пределах осуществлять независимую регулировку температуры плавильного и нагревательного блоков. Поскольку теплоизоляционный материал чрезвычайно легко обрабатывается, то после проведения предварительных (тарировочных) нагревов корректировка толщины теплоизоляции не вызывает никаких проблем. При разнице в толщине теплоизоляции плавильного и нагревательного блоков в 15-25 мм можно добиться устойчивого (и контролируемого) перепада температур: при заданной температуре в плавильном блоке в диапазоне 1600-1350 °С, в нагревательном блоке поддерживается температура в диапазоне 1250-1000 °С.

Параметры нагрева легко поддаются формализации, а, значит, позволяют реализовать компьютеризированную систему управления работой печи. Проведенные в печи сопротивления опытные плавки образцов специальных сплавов показали высокую воспроизводимость результатов при надежной работе нагревательных блоков и всей печи в целом.

Литература

1 *Электротермическое оборудование: справочник / под общ. ред. АЛ. Альтгаузена. - М.: Энергия; 1980. - 416 с.*

2 *Теория и практика литья радиоактивных металлов и сплавов / СИ. Бирюков, Ю.А. Метелкин, СИ. Иванов, Э.Н. Шингарев. - М.: Энергоатомиздат, 1989 - 270 с.*