

УДК 621.365.5

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ НАГРЕВА РАСПЛАВА ХЛОРАЛЮМИНАТА КАЛИЯ
С ТЕТРАХЛОРИДОМ ЦИРКОНИЯ**

T.S. Rudneva, I.O. Chernyavsky, A.S. Zavodchikov
АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт
неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва
IOChernyavsky@bochvar.ru

Проведены оценка готовности текущего состояния индукционного нагрева для расплавов хлоралюмината калия с тетрахлоридом циркония и сравнение нагрева материалов с помощью электродов с переменным током и индукцией, рассчитана зависимость глубины проникновения магнитного поля от частоты для различных материалов.

Ключевые слова: расплав хлоралюмината калия, тетрахлориды циркония и гафния, уровень готовности, индукционный нагрев, глубина проникновения магнитного поля, магнитные свойства конструкционных материалов.

**THE POSSIBILITIES OF USING INDUCTION TECHNOLOGY FOR HEATING
THE MELT OF POTASSIUM CHLORALUMINATE WITH ZIRCONIUM
TETRACHLORIDE**

T.S. Rudneva, I.O. Chernyavsky, A.S. Zavodchikov
JSC A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow

An assessment of the readiness of the current state of induction heating for melts of potassium chloraluminum with zirconium tetrachloride was carried out, a comparison of heating materials using alternating current and induction electrodes was carried out, the dependence of the depth of penetration of the magnetic field on the frequency for different materials.

Keywords: potassium chloraluminum melt, zirconium and hafnium tetrachlorides, readiness level, induction heating, magnetic field penetration depth, magnetic properties of structural materials.

Введение

Расплавы солей широко применяются при получении алюминия, магния, кальция, лития, циркония, гафния и других металлов. Использование хлоридно-солевых расплавов перспективно в ядерной энергетике в жидко-солевых реакторах.

Хлоралюминатный расплав со щелочными металлами обладает рядом свойств, таких как: хорошая растворимость хлоридов металлов, хорошая электропроводность и теплопроводность, высокая летучесть хлоридов по сравнению с фторидами и низкая стоимость [1].

Однако не стоит забывать о высокой коррозионной активности расплава при взаимодействии с конструкционными материалами особенно при повышенных температурах, а также о его склонности к гидролизу с водой и парами воздуха. Продукты гидролиза разлагаются на горячих электродах при классическом нагреве и зарастают оксидами (преимущественно корунд). В связи с невозможностью исключения гидролиза расплава и тетрахлоридов циркония и гафния в аппаратах и узлах установки ректификации предлагается рассмотреть новый способ нагрева расплава с применением индукции, исключая нагревающиеся элементы в виде электродов.

Уровень готовности технологии и производства

Концепция уровней готовности используется для оценки текущего состояния вновь создаваемых или приобретаемых технологий. Это позволяет оценить, как далеко продвинулась разработка, начиная от идеи её создания.

Таблица 1

Описание уровней готовности технологии и производства

TRL 1	Утверждение и публикация базовых принципов технологии
TRL 2	Формулировка концепции технологии и оценка области применения
TRL 3	Начало исследований и разработок
TRL 4	Проверка основных технологических компонентов в лабораторных условиях
TRL 5	Проверка основных технологических компонентов в реальных условиях
TRL 6	Испытания модели или прототипа в реальных условиях
TRL 7	Демонстрация прототипа (опытного образца) в условиях эксплуатации
TRL 8	Окончание разработки и испытание системы в условиях эксплуатации
TRL 9	Демонстрация технологии в окончательном виде при летных испытаниях образца

В табл. 1 представлено описание уровней TRL, разработанное Национальным аэрокосмическим агентством (NASA) США. В русскоязычной терминологии вместо TRL используется понятие «уровень готовности технологии (УГТ)» [2].

Применение индукционного нагрева для расплавов хлоралюмината калия с тетрагидрохлоридом циркония не описано в литературе, уровень TRL 0.

Сравнение классического нагрева (с помощью электродов, переменного тока) и индукции

При прямом нагреве расплава подвод переменного электрического тока осуществляется через электроды, изготовленные из проводящих материалов (металлы, графит). К недостаткам этого метода стоит отнести коррозию материалов электродов и осаждение на их поверхности непроводящих электрический ток оксидов, приводящих к ухудшению нагрева.

При индукционном нагреве необходимо воздействие переменного магнитного поля высокой частоты на материалы. Для нагрева материала его необходимо поместить внутрь индуктора (свитого в спираль проводника), в котором под действием специального генератора направляются переменные токи различной частоты, в результате проводник начинает излучать магнитное поле, пронизывающее электропроводящий материал, в следствие чего в нём возникают замкнутые токи высокой плотности, а энергия, затраченная на создание этих токов, преобразуется в тепловую энергию, которая и нагревает материал. Преимущества индукционного нагрева заключаются в том, что механизм действия такого нагрева исключает перегрев электродов, минимальный риск протечек, бесконтактная технология нагрева исключает коррозию, можно создать необходимую форму индуктора под любую задачу. Недостатками являются: способность не всех материалов поглощать электромагнитное излучение, подбор материалов.

Количество энергии внутри полости индуктора

При прохождении по индуктору переменного тока напряженность магнитного тока одинакова во всех его точках, поток энергии внутри полости индуктора через его поверхность на единицу длины можно рассчитать по формуле:

$$P = 7,9 \cdot 10^{-9} \cdot (I \cdot n)^2 \cdot f \cdot S, \quad (1)$$

где P – количество энергии, кварки; I – сила тока, А; n – количество витков, f – частота, Гц; S – площадь, м².

Из формулы можно сделать вывод о том, что зависимость $P(f)$ прямо пропорциональна и при увеличении частоты количество энергии внутри полости индуктора будет увеличиваться.

Глубина проникновения магнитного поля в материалы

Вследствие электромагнитной индукции частота индуктирующего тока совпадает с частотой первичного тока, плотность которого, так же как и индуктированного, различны по их сечению. Наибольшее значение наблюдается на поверхностях

материала и провода индуктора, по мере удаления от этих поверхностей плотность тока уменьшается по экспоненциальному закону.

Взаимное влияние магнитного поля и конвективных течений в расплаве можно оценить по глубине проникновения магнитного поля, которая определяется расстоянием от поверхности, на которой плотность тока уменьшается в $e=2,71$ раз относительно плотности тока на поверхности.

Тепло, выделяющееся при создании вихревых токов, накапливается в скин-слое материала, который содержит 86,4% тепла от общего тепловыделения. Для расчёта глубины проникновения магнитного поля в материал (толщины скин-слоя) можно воспользоваться формулой 2.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu \mu_0 f}}, \quad (2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом*м; μ и μ_0 – магнитная проницаемость материала и магнитная проницаемость в вакууме, f – частота, Гц.

В табл. 2 собраны магнитные свойства конструкционных материалов, материалов футеровки и расплава хлоралюмината калия и рассчитана по формуле 2 глубина проникновения магнитного поля в материал. Стоит отметить, что справочные табличные данные по удельному сопротивлению [4] для чистых веществ и для готовых изделий у поставщиков отличаются, что связано как с пористостью готовых изделий из керамических материалов, так и с чистотой применяемых для изготовления веществ.

На рис. 1 и на рис. 2 представлена зависимость глубины проникновения магнитного поля от частоты поля для материалов: расплав $KAlCl_4$, сталь 08X18H10T (10^2), кварцевое стекло (кварц). Зависимость была получена с помощью формулы (2) при разной частоте 100 Гц, 500 Гц, 2500 Гц, 5000 Гц, 10000 Гц, 15000 Гц, 25000 Гц, 35000 Гц, 50000 Гц, удельном сопротивлении и магнитной проницаемости из табл.2.

Из табл. 2 следует, что для стакана испарителя стоит использовать кварц или корунд, чтобы магнитное поле нагревало расплав в объеме. При использовании металлического стакана испарителя практически все тепло будет выделяться в стенке стакана, что может привести к его перегреву и повышенной коррозии или осаждению плохо проводящего тепло корунда на его поверхности. Базальт или крошка корунда могут быть использованы для набивки пространства между защитным экраном и стенкой стакана испарителя. Трубопроводы входа и выхода расплава также желательно выполнить из неметаллического материала (корунд или кварц), так как металлические трубы, находящиеся в зоне индукционного нагрева, будут нагреваться сильнее индуктором и возможна их забивка корундом.

Таблица 2

Магнитные свойства материалов и расчетная глубина проникновения магнитного поля в образец

Материал	Удельное сопротивление, Ом·м	Магнитные свойства	Магнитная восприимчивость, СИ	Магнитная проницаемость	Частота поля индуктора, Гц	Глубина проникновения, м
Базальт (сухой) [3]	2000	Парамагнетик	0,002	1	50000	100,6598
KCl тв [4]	-	Диамагнетик	-39	0,999961	50000	-
AlCl ₃ тв [4]	0,04	Диамагнетик	-0,6	0,9999994	50000	0,4502
KCl ж [4]	-	Диамагнетик	-		50000	-
AlCl ₃ ж [4]	-	Диамагнетик	-		50000	-
сталь 08X18H10T [5]	0,0000008	Парамагнетик		1,015	50000	0,0020
сплав Hastelloy G35 [6]	0,00000124			1	50000	0,0025
сплав Hastelloy "А" [6]	0,000001232			-	50000	-
сплав Hastelloy "В" и "С" [7]"	0,000001326			1,001	50000	0,0026
сплав Hastelloy "D" [7]	0,000001149			-	50000	-
сплав Hastelloy "X" [7]	0,000001149			1	50000	0,0024
Кварцевое стекло [8]	7000000000	Диамагнетик		0,9999849	50000	188318,6469
Al ₂ O ₃ корунд, оксид алюминия [9]	101300			1	50000	716,3838
KAlCl ₄ жидкий (расплав), 500 С [2]	0,01242236			1	50000	0,2509
KAlCl ₄ расплав с 7,69 масс % ZrCl ₄ , 500 °С [2]	0,012987013			1	50000	0,2565
KAlCl ₄ расплав с 25,6 масс % ZrCl ₄ , 500 °С [2]	0,014925373			1	50000	0,2750
Углерод (графит) твердый [4]	0,00031	Диамагнетик		0,999895	50000	0,0396
импортный изостатический мелкозернистый графит [10]	0,000011	Диамагнетик		0,999895	50000	0,0075
графит марки ЭГ-РР, ЭГП-НР, ЭГСП-УНР [11]	0,000007	Диамагнетик		0,999895	50000	0,0060

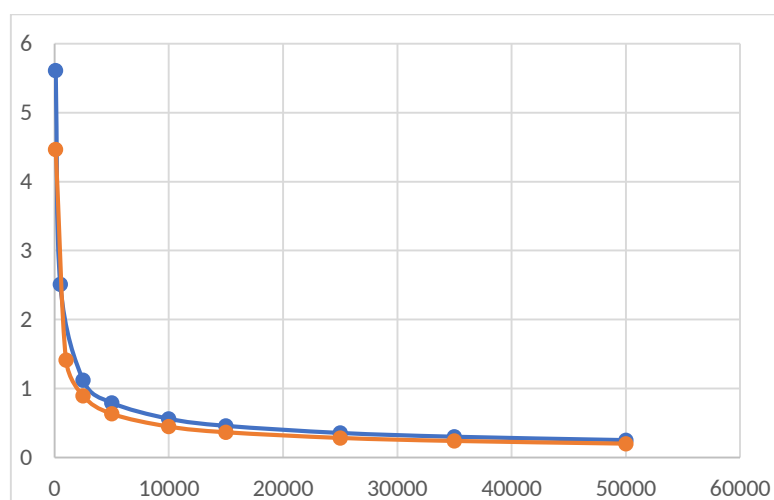


Рис. 1. Зависимость глубины проникновения магнитного поля (м) от частоты для материалов: расплав KAlCl₄ (синий цвет), сталь 08X18H10T (10²) (оранжевый цвет)

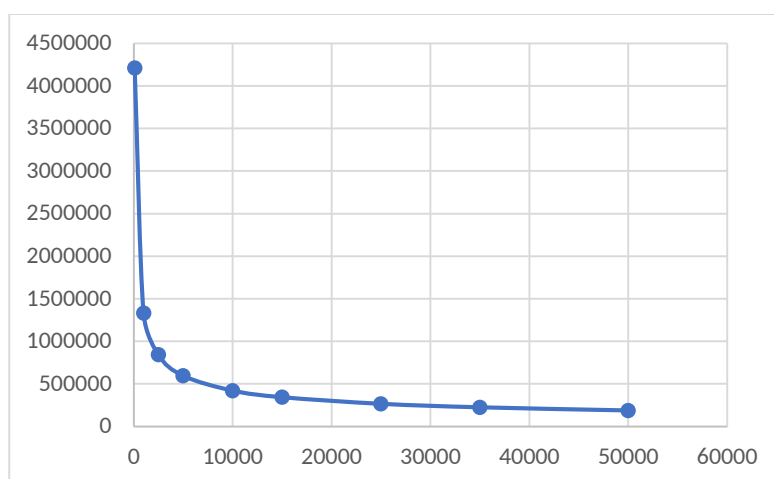


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения магнитного поля (м) от частоты для кварцевого стекла (кварц)

На графиках видно, что с увеличением частоты глубина проникновения магнитного поля уменьшается.

Индуктивное поле искажает сигнал термопар, вызывая индукционное напряжение и индуктивных нагрев термопар [12]. Поэтому необходимо экранировать термопары от индукционного поля.

Выводы

1. Применение индукции для нагрева расплава хлоралюмината калия возможно, но ширина аппарата ограничена глубиной проникновения магнитного поля в расплав.

2. Глубина проникновения магнитного поля с увеличением частоты уменьшается, а энергия индукции с увеличением частоты увеличивается, поэтому необходимо искать оптимальные условия для нагрева материалов.

3. Глубина проникновения магнитного поля в диэлектрики большая, в металлы - несколько миллиметров. Поэтому оптимально для материала стакана испарителя использовать диэлектрики (кварц или корунд), чтобы тепло выделялось внутри расплава.

4. Использование металлического стакана испарителя не имеет смысла, так как все тепло будет выделяться в стенке стакана и приводить к его перегреву и возможному зарастанию продуктами гидролиза.

5. В металлических трубопроводах входа и выхода расплава также возможно выделение корунда из-за их перегрева, если они находятся в зоне индукционного нагрева.

6. В зоне индукционного нагрева термопары для контроля температуры не используются. Необходимо термопары экранировать для получения верных показаний температуры расплава.

Список литературы

1. Карпов В.В. Электрохимическое поведение и коррозионная активность хлоралюминатных цирконийсодержащих расплавов. Диссерт. КХН. Екб.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», 2022, С. 3.
2. ГОСТ Р 58048-2017 Трансфер технологий. Методические указания по оценке уровня зрелости технологий М.: Стандартинформ, 2018, С. 41.
3. Удельное сопротивление грунта: [Электронный ресурс]. https://zandz.com/ru/udelnoe_soprotivlenie_grunta/ (Дата обращения 01.10.2024)
4. Джанколи Д.К. Физика. Т. 2. М.: Мир, 1989. 672 с.
5. Сталь 08X18H10T: [Электронный ресурс]. <https://metal.place/ru/wiki/08kh18n10t/> (Дата обращения 01.10.2024).
6. Характеристики сплава Хастеллой G-35: [Электронный ресурс]. https://emk24.ru/wiki/nikel_i_ego_splavy/alloy-g-35-hastelloy-g-35-uns-n06035_15618983/ (Дата обращения 22.10.2024).
7. Hastelloy powders [Электронный ресурс]. <https://met3dp.com/ru/hastelloy-powders-20231226/> (Дата обращения 01.10.2024).
8. Технические характеристики кварцевого стекла: [Электронный ресурс]. <https://quartz33.ru/tehnicheskie-harakteristiki.html> (Дата обращения 01.10.2024).
9. Физико-химические показатели корундовых тиглей: [Электронный ресурс]. <https://podolskogneupor.ru/crucibles-korundum/> (Дата обращения 01.10.2024).
10. Импортный изостатический мелкозернистый графит: [Электронный ресурс]. <https://grafit-resurs.ru/marki-grafitov/#importnyi-izostaticheskii-melkozernisty-grafit> (Дата обращения 01.10.2024)
11. ТУ 1911-109-052-2003 Электроды графитированные и nipples к ним. М.: Министерство промышленности, науки и технологий Российской Федерации, Департамент промышленной и инновационной политики в металлургии, С. 41.
12. Приборы для измерения температуры в электромагнитных средах: [Электронный ресурс]. <https://olil.ru/articles/pribory-dlya-izmereniya-temperatury-v-elektromagnitnyh-sredah/> (Дата обращения 22.10.2024).