06

Максимальный объем капли расплава редкоземельного металла при плавке во взвешенном состоянии в осесимметричном индукторе

© А.Е. Рудоминский, М.П. Волков

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.rudominskiy@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 июля 2025 г.
В окончательной редакции 22 сентября 2025 г.
Принято к публикации 6 октября 2025 г.

Для ряда редкоземельных металлов иттриевой группы (Y, Tb, Dy, Ho, Er, Yb) определены максимальные объемы капли расплава, устойчиво удерживаемой электромагнитным полем во взвешенном состоянии в осесимметричном индукторе. Экспериментальные значения максимальных объемов сравниваются со значениями, рассчитанными с использованием величин поверхностного натяжения, удельного сопротивления и плотности редкоземельных металлов в расплавленном состоянии.

Ключевые слова: редкоземельные металлы, плавка во взвешенном состоянии, высокие температуры, чистые металлы.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.03.62183.20442

Редкоземельные металлы (РЗМ) обладают высокой химической активностью и требуют особых условий для их плавления. Для переплавки РЗМ и получения сплавов на их основе хорошо подходит бестигельный метод плавки во взвешенном состоянии при электромагнитном удержании капли расплава [1]. Этот метод позволяет получить хорошо перемешиваемую высокотемпературную каплю расплава без контакта с контейнером. Метод применяется для получения сплавов на основе РЗМ, очистки их от газообразных примесей и определения поверхностного натяжения расплава. Использование метода плавки во взвешенном состоянии ограничено получением небольших количеств сплавов для дальнейших физико-химических исследований.

В индукторах, применяемых для плавки металлов во взвешенном состоянии, всегда существуют области ослабленного поля, через которые жидкий металл не выливается лишь благодаря давлению, обусловленному силами поверхностного натяжения на искривленной поверхности, — давлению Лапласа. Оценка условий равновесия для левитирующей капли была предложена в работе [2] и рассматривается далее. В любой точке на поверхности капли существует равновесие давлений

$$\sigma_t = \sigma_e + \sigma_g + C,$$

где σ_t — давление, обусловленное поверхностным натяжением, σ_e — давление электромагнитного поля на металл, σ_g — гидростатическое давление столба жидкости, C — давление, обусловленное поверхностным натяжением в верхней точке капли, которым можно пренебречь при плоской верхней поверхности. $\sigma_t = 2\alpha/r$, где α — поверхностное натяжение, r — радиус кривизны поверхности в данной точке.

Давление электромагнитного поля на металл при поверхностном проникновении поля в металл выражается формулой $\sigma_e = \mu H^2/4$, где H — амплитуда напряженности магнитной составляющей поля на поверхности металла.

Гидростатическое давление $\sigma_g = hdg$, где h — высота капли (размер капли по вертикали), d — плотность жидкого металла, g — ускорение силы тяжести. Для нижней части капли получаем

$$2\alpha/r + \mu H^2/4 = h_{\max} dg,$$

где $h_{\max}$ — максимальная высота капли. Минимальный радиус нижней поверхности капли не может быть меньше глубины проникновения Δ электромагнитного поля в металл, так как капля меньшего размера прозрачна для поля данной частоты.

Отсюда следует зависимость предельной высоты столба жидкого металла от его капиллярной постоянной. Можно получить выражение для максимального объема металла, устойчиво удерживаемого во взвешенном состоянии:

$$V_{\max} = (1/6)\pi(a^2/\Delta)^3, \tag{1}$$

где a — капиллярная постоянная металла [cm],

$$a = \sqrt{2\alpha/dg}, \tag{2}$$

В формуле (2) α — поверхностное натяжение [N/m], d — плотность расплавленного металла [kg/m^3], g — ускорение силы тяжести. Δ — глубина проникновения электромагнитного поля в металл [m],

$$\Delta = \sqrt{\rho/\mu\pi f}, \tag{3}$$

где ρ — удельное сопротивление [$\Omega \cdot$ m], f — частота поля [Hz], μ — магнитная проницаемость [H/m].

В формуле (1) в качестве объема $V_{\max}$ принят объем шара с диаметром, равным предельной высоте капли.

Сравнение расчетных и экспериментальных параметров левитирующих капель редкоземельных металлов

Металл	Поверхностное натяжение α, N/m (при $T_m + 250\,^\circ$C)	Плотность d, g/cm^3 (при $T_m + 250\,^\circ$C)	Капиллярная постоянная a, cm	Удельное сопротивление $\rho, \mu\Omega \cdot$ cm	Глубина проникновения Δ, cm	Оценка максимальной массы m_o, g	m_{exp}, g	$V_{\max}$, cm^3
Y	0.792, 0.851	4.09, 4.18	0.628, 0.65	80	0.0960	150.1, 183	30	7.32
Tb	0.799, 0.648	7.72, 7.7	0.459, 0.414	130	0.122345	21, 11.1	15	1.94
Dy	0.891, 0.623	7.72, 8.01	0.485, 0.399	110	0.112541	37, 11.9	20	2.59
Ho	0.619	8.21, 8.19	0.392, 0.393	90	0.101797	15.5, 14.9	30	3.65
Er	0.607	8.47, 7.98	0.382, 0.394	90	0.101797	13.7, 14.8	15	1.77
Yb	0.294	5.91, 6.07	0.319, 0.314	110	0.05033	2.58, 2.15	12	2.03

Так как реальная форма капли не шарообразная, эта формула несколько завышает максимальный объем стабильно удерживаемой капли расплава.

Следует отметить, что достижение максимального объема капли расплавленного металла может быть ограничено параметрами экспериментальной установки, а именно мощностью генератора и допустимым напряжением на индукторе для уменьшения вероятности электрического разряда. В настоящей работе капли РЗМ удерживались во взвешенном состоянии при мощности генератора порядка 15 kW и максимальной его мощности 30 kW, а использованная частота 220 kHz существенно меньше частоты в 400 kHz, которую рекомендуется не превышать во избежание электрических разрядов [1,2]. Кроме того, для всех металлов использовался один и тот же индуктор, и взвешенные капли близкого размера находились в области с примерно одинаковым градиентом магнитного поля. Таким образом, параметры экспериментальной установки не ограничивают достижение максимального объема капли РЗМ, а основное влияние оказывает только капиллярная постоянная металла.

В настоящей работе проведено плавление ряда чистых РЗМ и проведено сравнение максимальных объемов жидкой капли, стабильно удерживаемых во взвешенном состоянии, со значениями, рассчитанными с использованием литературных данных о плотности, удельном сопротивлении и поверхностном натяжении расплавов РЗМ. Следует отметить, что в литературе имеется значительный разброс величин этих параметров для расплавов РЗМ, что может быть связано как с использованием разных методик определения параметров, так и со степенью чистоты исследованных металлов по газообразным и металлическим примесям.

Все РЗМ, кроме скандия и иттрия, имеют низкие значения капиллярной постоянной ($a \sim 0.5$ cm) и удерживаются во взвешенном состоянии при меньшем объеме капли, чем другие металлы. Поверхностное натяжение расплавов металлов сильно зависит от содержания примесей, в первую очередь газовых. Так, например, для алюминия при температуре плавления (933 K) поверхностное натяжение чистого металла составляет около 1.05 N/m, но при насыщении кислородом оно снижается до 0.85 N/m [3]. Даже концентрации кислорода на уровне 0.0005 % могут привести к насыщению поверхности, что существенно влияет на поверхностное натяжение. Подробно механизм влияния растворенных газов у поверхности расплава металла представлен в работе [4]. Для редкоземельных металлов опубликованные данные по поверхностному натяжению расплавов не содержат указаний на содержание газовых примесей. Можно предположить, что результаты наших экспериментов соответствуют образцам достаточной чистоты, так как при плавке во взвешенном состоянии материал очищается от газообразных примесей. Для расчета наибольших объемов капли использовались литературные данные о значениях капиллярной постоянной и плотности [5–7], а также электрического сопротивления расплавов РЗМ [8,9]. Так как коэффициенты поверхностного натяжения и плотности расплавов РЗМ зависят от температуры, при расчетах использовались значения при температуре на 250 °C выше температуры плавления с учетом данных работ [5,6].

РЗМ плавились в индукторе с параллельным обратным витком при частоте поля 220 kHz. Все исследованные РЗМ устойчиво удерживаются во взвешенном состоянии в виде капель расплава диаметром 1.5–2 cm с установившимися температурами на 200–300 °C выше температуры плавления. Максимальный вес удерживаемой капли определялся последовательным увеличением веса левитирующей капли расплава РЗМ при помощи манипулятора, управляемого извне вакуумной камеры, вплоть до веса, при котором капля уже не удерживается электромагнитным полем. При таком методе вес максимальной капли удается определить с точностью лучше 0.5 g. Для предотвращения сильного испарения капли плавильная камера была заполнена очищенным гелием.

В таблице приведены литературные данные о поверхностном натяжении α и плотности d при температуре на

250 °C выше температуры плавления и удельном сопротивлении ρ при T_m, взятые в основном из обзоров [5,6], при этом для каждого параметра могут указываться два значения, если они существенно различаются в разных источниках. Также приведены значения капиллярной постоянной a, вычисленные по формуле (2), и глубины проникновения Δ, вычисленные по формуле (3). В последних столбцах таблицы приведены вычисленные по формуле (1) значения максимального веса m_o левитирующей капли исследованных РЗМ (с учетом разброса в литературных данных), а также экспериментально полученные значения максимального веса m_{exp} и соответствующего ему максимального объема левитирующей капли $V_{\max}$.

Для всех исследованных металлов максимальный вес находится в интервале 10–30 g, хотя значения поверхностного натяжения, плотности и удельного сопротивления отдельных металлов могут сильно различаться, приводя к большому отличию вычисленных максимальных масс.

Рассмотрим результаты для разных металлов.

1. Иттрий обладает самым большим поверхностным натяжением среди рассмотренных металлов, и рассчитанный максимальный вес капли находится в интервале 150–183 g, а экспериментальный результат 30 g. Такое отличие может быть связано с наличием большого количества газовых примесей, прежде всего кислорода, который может снижать поверхностное натяжение расплава и как растворенная примесь, и путем образования частиц оксида Y_2O_3. Плотность Y_2O_3 (5 g/cm^3) существенно выше плотности расплава иттрия (~ 4.1 g/cm^3), поэтому частицы будут перемещаться в нижнюю часть капли, влияя на свойства расплава в нижней точке.

2. Тербий, диспрозий и эрбий. Измеренные максимальные веса капель тербия 15 g (расчет 11.1–21 g), диспрозия 20 g (расчет 11.9–37 g) и эрбия 15 g (расчет 13.7–14.8 g) находятся в хорошем согласии с расчетами. Отметим, что максимальный вес капли расплава диспрозия оказался достаточным для получения отливок в форме плоских шайб, которые были использованы для увеличения магнитного поля в сверхпроводящем соленоиде на 3 T в зазоре 2 mm.

3. Гольмий, иттербий. Значения поверхностного натяжения этих металлов приводится в литературе без указания их чистоты. Рассчитанный по уравнению (1) максимальный вес этих металлов оказался меньше полученного в эксперименте. Для гольмия рассчитанный вес — 14.9–15.5 g, а экспериментальное значение — 30 g, для иттербия рассчитанный вес 2.15–2.58 g при экспериментальном значении 12 g. Это различие указывает на то, что реальные значения поверхностного натяжения этих металлов выше приводимых в литературе.

В целом экспериментально полученные результаты показывают, что с использованием осесимметричных индукторов можно расплавить только небольшие количества редкоземельных металлов. Для увеличения количества расплава, удерживаемого во взвешенном состоянии, был предложен ряд модификаций системы индукторов. Прежде всего было предложено использовать индукторы, вытянутые вдоль одного направления в горизонтальной плоскости [10], в которых расплавленный металл приобретает форму цилиндра, что значительно увеличивает удерживаемую массу расплава. Отметим, что и в этом случае максимальное количество удерживаемого металла определяется в основном поверхностным натяжением в нижней зоне расплава. Недавно была предложена еще одна система индукторов, которая создает вместо вертикально ориентированного поля горизонтальные поля сложной конфигурации и разных частот с несколькими областями пониженного поля [11]. В этой сложной системе удается существенно увеличить объем расплавленного металла во взвешенном состоянии (до 0.5 kg для алюминия).

Таким образом, и проведенные расчеты максимального веса расплава РМЗ, и экспериментальные значения, полученные для ряда РЗМ иттриевой группы, показывают, что при использовании наиболее простых осесимметричных индукторов возможно стабильное удержание капель размером 10–30 g, что достаточно для получения сплавов РЗМ для дальнейших физико-химических исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] А.А. Фогель, *Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии* (Машиностроение, Л., 1979).

[2] А.А. Фогель, И.В. Коркин, Физика и химия обработки материалов, **5** (3), 18 (1972).

[3] E. Yousefi, Y. Sun, A. Kunwar, M. Guo, N. Moelans, D. Seveno, Acta Mater., **221**, 117430 (2021). DOI: 10.1016/j.actamat.2021.117430

[4] A E. Gheribi, P. Chartrand, Sci. Rep., **9** (1), 7113 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-43500-3

[5] V.I. Kohonenko, A.L. Sukhman, S.L. Gruverman, V.V. Torokin, Phys. Status Solidi A, **84** (2), 423 (1984). DOI: 10.1002/pssa.2210840210

[6] T. Ishikawa, J.T. Okada, J. Li, P.-F. Paradis, Y. Watanabe, *JAXA research and development report*, JAXA-RR-08-003E (Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, 2009), p. 1.

[7] P.-F. Paradis, T. Ishikawa, N. Koike, Y. Watanabe, J. Rare Earths, **25** (6), 665 (2007). DOI: 10.1016/S1002-0721(08)60003-4

[8] А.Д. Ивлиев, ФТТ, **62** (10), 1587 (2020). DOI: 10.21883/FTT.2020.10.49900.110 [A.D. Ivliev, Phys. Solid State, **62** (10), 1755 (2020). DOI: 10.1134/S1063783420100145].

[9] A.M. Bopa, TBT, **46** (6), 870 (2008). [A.M. Vora, High Temp., **46** (6), 800 (2008).
DOI: 10.1134/S0018151x08060102].
[10] R. Shampine, I. Bayazitoglu, IEEE Trans. Magn., **33** (6), 4427 (1997). DOI: 10.1109/20.649876
[11] S. Spitans, E. Baake, A. Jakovics, H. Franz, Int. J. Appl. Electromagn. Mech., **53** (1), 61 (2017).
DOI: 10.3233/JAE-162238