

Предлагаемая вниманию читателей статья посвящена численному моделированию взаимного влияния электромагнитных и гидродинамических полей, а также формы свободной поверхности жидкого металла при обработке в индукционных металлургических установках с целью получения сплавов высокой степени чистоты. Эффект достигается при плавке в “подвешенном” состоянии, когда расплав находится в состоянии левитации в электромагнитном поле, или за счет сокращения площади контакта расплава со стенками холодного тигля.

Затрагиваемые в статье вопросы (разработка CAE-моделей и численных методик, выполнение многовариантных расчетов на высокопроизводительной вычислительной технике с применением коммерческих CAE-пакетов ANSYS Classic, CFX и Fluent, дополненных программным кодом собственной разработки) относятся к этапу инженерного анализа характеристик проектируемого металлургического оборудования, основанного на энергоэффективных электротехнологиях.

Краткий обзор ранее применяемых моделей можно найти в статье “*Multiphysics: многодисциплинарное моделирование металлургических магнитогидродинамических технологий. Эволюция моделей индукционной печи с холодным тиглем*” (Observer #3/2009).

Новый подход к сопряженному моделированию физических процессов при проектировании электротехнологических установок для получения сверхчистых сплавов

С.Спитан, Э.Бааке (Институт электротехнологий, г.Ганновер), А.Якович, С.Павлов (Латвийский университет)

В металлургической промышленности широко применяются индукционные печи, в которых с помощью электромагнитного (ЭМ) поля обеспечивается бесконтактное управление перемешиванием, формой свободной поверхности и температурой расплавленного металла. Необходимость достижения заданных свойств получаемых металлов и сплавов выдвигает определенные требования к форме и поведению свободной поверхности, а также к выбору технологического процесса обработки расплава.

Так, например, необходимая температура перегрева расплава при нанесении покрытий методом вакуумной металлизации (*Metal Evaporation and Coating*) может быть достигнута при ЭМ-левитации расплава. В этом случае свободная поверхность расплава, форма которой стабилизируется с помощью ЭМ-поля, не имеет контакта с поверхностью тигля [1].

Между тем, динамика свободной поверхности, которая является результатом взаимодействия ЭМ-поля и течения расплава, может быть достаточно сложной, а форма свободной поверхности – нестабильной. Причиной нестабильности является изменение режима подвода мощности в рамках технологического процесса, а также неустойчивость циркуляции расплава и её турбулентный характер.

Ввиду важности контроля свободной поверхности в процессе ЭМ-обработки высокотемпературных металлических материалов, востребованным является численное моделирование динамики свободной поверхности. Из публикаций, относящихся к этому направлению, отметим следующие.

В работе [2] рассматривается моделирование физических процессов в индукционных печах,

включая тепло- и массоперенос, кристаллизацию расплава и гомогенизацию легирующих частиц, в трехмерной (3D) постановке. Свободная поверхность считается стационарной, а её фиксированная форма определяется в гидростатическом приближении. Турбулентный характер течения расплава учитывается с помощью метода моделирования крупных вихрей (*Large Eddy Simulation – LES*).

В работе [3] динамика свободной поверхности, циркуляция и теплоперенос в расплаве, рассматриваются в состоянии левитации в ЭМ-поле, рассматривается с применением упрощенных двухпараметрных моделей турбулентности в двухмерной (2D) постановке. Изучаются также процесс кристаллизации и поведение свободной поверхности в индукционных печах.

Недавно были опубликованы [4] первые результаты численного 3D-моделирования динамики жидкой капли в сильном магнитном поле, созданном источником постоянного тока.

Однако для индукционных металлургических устройств к настоящему моменту пока не разработан подход к 3D-моделированию физических процессов, когда одновременно рассматривается динамика свободной поверхности, а расчеты течения расплава проводятся с помощью LES-модели турбулентности. Ранее проведенные исследования показали, что для индукционной тигельной печи (ИТП) с характерной структурой осредненного течения, состоящей из двух тороидальных вихрей, только LES-модель позволяет получить численные результаты, согласующиеся с экспериментальными данными [2].

В статье, предлагаемой вниманию читателей, представлен новый универсальный подход,

обеспечивающий сопряженное 3D-моделирование течения жидкого металла, динамики свободной поверхности и ЭМ-поля в индукционных печах различной конструкции [5]. Разработанная модель, кроме того, может быть использована в случае левитации расплава, обеспечиваемой ЭМ-полем. При этом описание течения расплава производится как с применением упрощенной двухпараметрной, так и LES-модели турбулентности [6].

Допущения, используемые в процессе численного моделирования

Поскольку индуцированное ЭМ-поле и вихревые токи имеют гармонический характер, силу Лоренца f_{Lor} можно разделить на стационарную и гармоническую часть, при этом гармоническая часть меняется во времени с удвоенной частотой

$$\vec{f}_{Lor} = \langle \vec{f}_{Lor} \rangle + \tilde{\vec{f}}_{Lor} \cdot \cos(2\omega t + \varphi) \quad (1)$$

где ω – угловая частота и φ – фаза.

Ввиду инерции расплавленного металла характерное время его реакции на изменения ЭМ-силы существенно превышает период переменного ЭМ-поля, соответствующий рассматриваемым частотам ($\omega/(2\pi) > 50 \text{ Hz}$), поэтому в процессе моделирования учитывается только стационарная часть силы Лоренца.

Для проведения оценок введем безразмерную частоту $\hat{\omega}$, отражающую соотношение индуцированного и внешнего ЭМ-полей, и магнитное число Рейнольдса Re_m , которое показывает отношение ЭМ-поля, индуцированного движением расплава, к внешнему ЭМ- полю

$$\hat{\omega} = \omega \sigma \mu_0 r_0^2 \quad Re_m = \sigma \mu_0 r_0 v_0 \quad (2)$$

где σ – электропроводность, μ_0 – магнитная постоянная, r_0 и v_0 – характерная длина и скорость.

Оценка отношения $\hat{\omega}$ и Re_m для характерной ИТП

$$\frac{\hat{\omega}}{Re_m} = \frac{\omega r_0}{v_0} \gg 1 \quad \frac{\omega}{2\pi} > 50 \text{ Hz} \quad r_0 \approx 1 \text{ m} \quad v_0 \approx 1 \text{ m/s} \quad (3)$$

показывает, что ЭМ-полем, индуцированным движением расплава, можно пренебречь.

Для нахождения распределения силы Лоренца и формы свободной поверхности расплава используется реализованный в пакете ANSYS Classic метод конечных элементов. При этом решаются уравнения Максвелла для переменного ЭМ-поля (считается, что в системе отсутствует свободный электрический заряд, а также токи смещения, ответственные за распространение ЭМ-волн) с учетом закона Ома (считается, что генерируемое движением расплава ЭМ-поле отсутствует).

В гидродинамической (ГД) части задачи используется реализованный в пакете ANSYS Fluent метод конечных объемов. При этом решаются

уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Поскольку оценка числа Рейнольдса для характерной ИТП

$$Re = \frac{r_0 v_0 \rho}{\eta} > 10^3 \quad (4)$$

показывает, что течение расплава является турбулентным (ρ – плотность и η – динамическая вязкость жидкого металла), в процессе моделирования используются также модели турбулентности $k-\omega$ SST или LES.

Для расчета двухфазного потока применяется метод “объема жидкости” (Volume of Fluid – VOF). В методе VOF соотношение фаз потока определяется скалярным полем объемной доли $F(x_i, y_i, z_i, t)$. Если $F = 1$, это означает, что элемент сетки содержит только первую фазу (расплав), если же $F = 0$, то элемент сетки содержит только вторую фазу (воздух). Если межфазная поверхность пересекает элемент сетки, то $0 < F < 1$. Динамика фазовой поверхности определяется при решении уравнения переноса

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla F = 0 \quad (5)$$

а свободная поверхность строится как изоповерхность, соответствующая $F = 0.5$.

Объемная плотность силы поверхностного натяжения определяется как

$$\vec{f}_\gamma = -\gamma(\nabla \cdot \vec{n})\vec{n} \delta_\gamma \quad (6)$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения, \vec{n} – нормаль к свободной поверхности, а δ_γ – дельта-функция, обеспечивающая отличие от нуля силы поверхностного натяжения только на свободной поверхности.

Реализация расчетной модели

Расчет динамики свободной поверхности при движении жидкого металла, вызванного силой Лоренца, осуществляется с помощью пакета ANSYS Classic – для расчета ЭМ-поля, пакета ANSYS Fluent – для расчета двухфазного течения, пакета ANSYS CFX – для постпроцессорной обработки результатов. Согласованная работа пакетов обеспечивается модулем “внешнего сопряжения” (external coupler), реализованного в виде командного файла (табл. 1).

Начальная форма свободной поверхности расплавленного металла, так же как и каждая последующая мгновенная форма поверхности, полученная в результате ГД-расчетов, записывается в файл. Этот файл содержит номера ключевых точек (keypoint – KP) свободной поверхности, координаты KP и семейства последовательностей номеров KP, которые показывают порядок соединения KP свободной поверхности для построения простых многогранников.

После передачи набора KP и простых многогранников, аппроксимирующих свободную поверхность,

из пакета *CFX-Post* в пакет *ANSYS Classic* выполняется фильтрационная процедура, для чего используется программа собственной разработки. Фильтрационная процедура позволяет удалить вырожденные поверхностные многогранники с большими значениями соотношений характерных размеров граней, что является причиной проблем, возникающих при построении сетки в пакете *ANSYS Classic*. Таким образом, в результате получается прошедшая процедуру фильтрации свободная поверхность, которая состоит из простых треугольных невырожденных поверхностей. После этого генерируется конечно-элементная сетка для решения ЭМ-задачи.

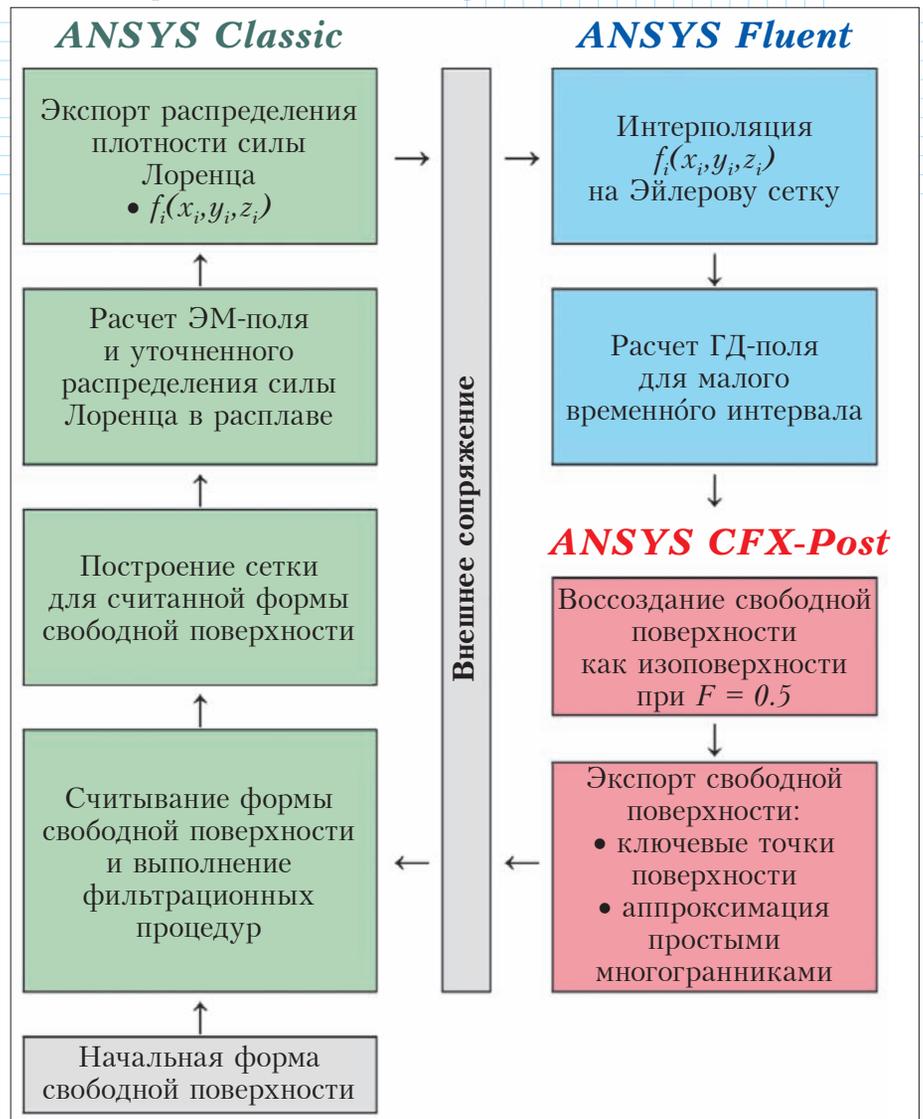
Далее рассчитывается распределение переменного ЭМ-поля при фиксированной форме свободной поверхности. Найденные координаты центров тяжести элементов сетки, а также значения компонент плотности силы Лоренца записываются в файл.

Перед расчетом нестационарного ГД-поля плотность силы Лоренца интерполируется на конечно-объемную сетку, используемую в *ANSYS Fluent*. Сила Лоренца используется в качестве источника в уравнениях, определяющих двухфазное течение. Далее производится расчет нестационарного течения при достаточно малом значении интервала времени, для которого можно считать, что небольшое изменение формы свободной поверхности не влияет на распределение силы Лоренца.

Не являющееся физическим эффектом ускорение воздуха, неизбежно возникающее при перемещении межфазной границы в методе *VOF*, демпфируется с помощью искусственного технического приема: на небольшом расстоянии от свободной поверхности расплава значение скорости воздуха задается заново (*re-initialization*). Такой прием позволяет добиться устойчивости вычислительного процесса при расчете динамики свободной поверхности в случае ярко выраженного скин-эффекта ЭМ-поля.

По завершении расчета ГД-поля полученное новое состояние нестационарной формы свободной поверхности записывается в файл. Далее заново

Табл. 1. Численное моделирование динамики свободной поверхности расплавленного металла: сопряжение расчетных задач для определения ЭМ- и ГД-полей



вычисляется распределение силы Лоренца, соответствующее новой форме свободной поверхности.

Повторение полного цикла представленного вычислительного алгоритма обеспечивает автоматизированный расчет динамики свободной поверхности как в *2D*-, так и в *3D*-постановке.

Возможности применения разработанной численной методики

✓ Расчет формы мениска в индукционной печи с холодным тиглем (ИПХТ)

В ИПХТ, которая широко используется для плавки химически активных металлов с целью получения готовых отливок высокой степени чистоты, расплав отжимается от стенок тигля с помощью ЭМ-поля и соприкасается только с гарниссажем,

который образуется в донной части водоохлаждаемого тигля.

Для проверки разработанной расчетной модели использовались результаты экспериментов на промышленной ИПХТ, для которой была измерена форма свободной поверхности расплавленного алюминия [7]. Конструкция печи включала разделенный на 26 секций медный тигель с короткозамкнутым кольцом в нижней части, медную сплошную донную часть и медный индуктор с пятью витками (рис. 1а).

Расчетная модель учитывала неоднородность ЭМ-поля в азимутальном направлении, вносимую секционированным тиглем, однако поворотная симметрия установки позволяла рассматривать расчетную область с азимутальными размерами, соответствующими только одной секции тигля (рис. 1б). Считалось, что расплав, донная часть и тигель разделены воздушным зазором толщиной 1 мм, введение которого оправдано высоким электрическим сопротивлением гарниссажа, который появляется на границе соприкосновения расплава с водоохлаждаемым тиглем.

Расчет ГД-поля проводился на сетке, где размер элементов в азимутальном направлении

соответствовал угловому размеру одной секции тигля. Это обеспечивало осреднение силы Лоренца в азимутальном направлении и соответствовало двухмерному аксиально-симметричному приближению.

Сравнение экспериментальных данных [7] с результатами численных расчетов для формы свободной поверхности расплавленного алюминия в ИПХТ при различном начальном заполнении печи и различных режимах подвода мощности демонстрирует хорошее согласование результатов (рис. 1с-1г) и, таким образом, подтверждает достоверность результатов моделирования.

✓ Моделирование динамики свободной поверхности в индукционной тигельной печи (ИТП)

Для периода колебаний свободной поверхности расплавленного металла в аксиально-симметричной ИТП проведена аналитическая оценка [8]. Использовалось приближение малой амплитуды колебаний, сила Лоренца считалась радиальной и постоянной по величине. В этом случае характерный период колебания

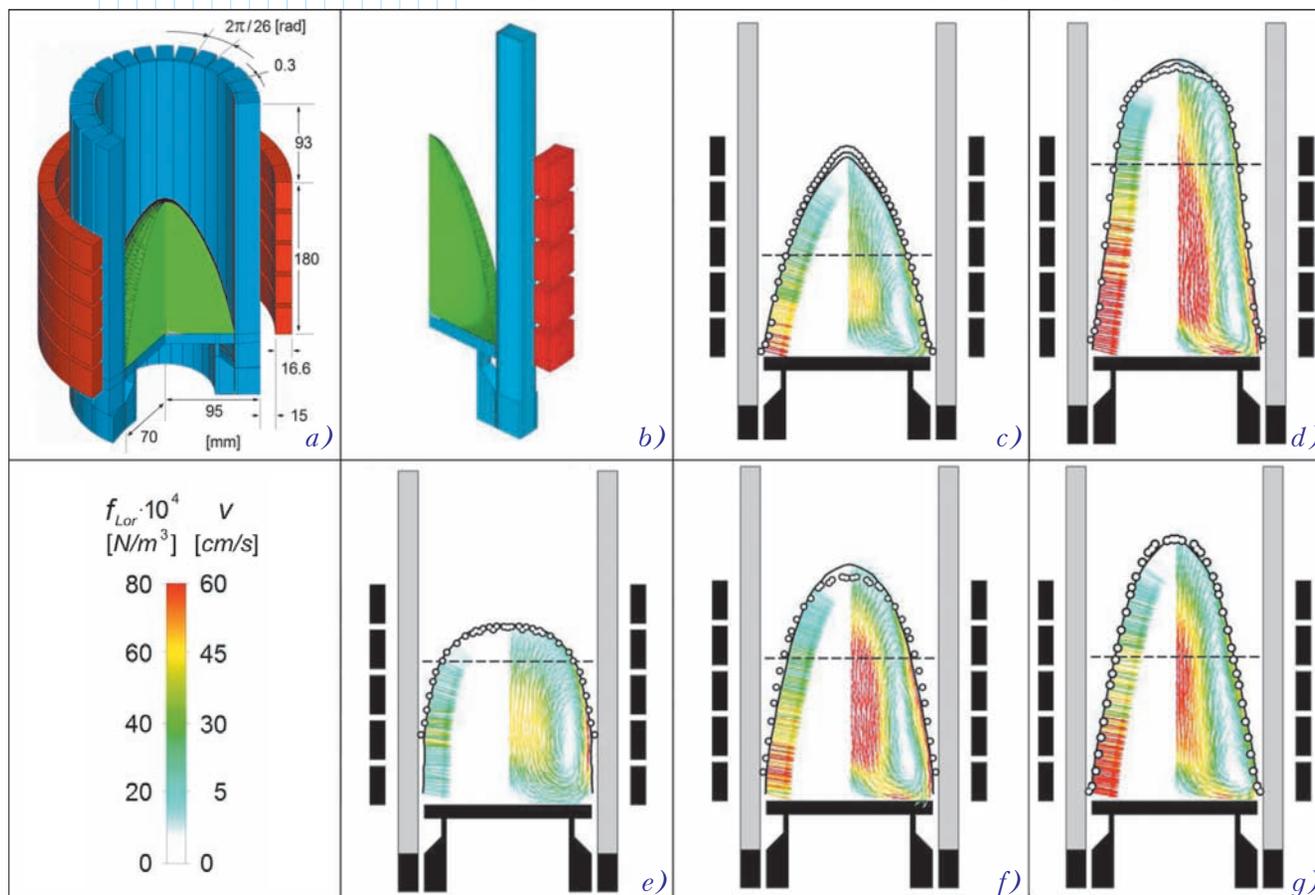


Рис. 1. а) геометрия ИПХТ с секционным тиглем; б) сетка для расчетов ЭМ-поля. Измеренная экспериментально [7] (точки) и рассчитанная (сплошная линия) стационарная форма мениска; вектора силы Лоренца (слева) и скорости стационарного течения расплава (справа) получены для различного начального заполнения тигля h (пунктирная линия) и эффективного значения тока в индукторе I_{ef} : с) $h = 46\%$, $I_{ef} = 3154$ А; д) $h = 87\%$, $I_{ef} = 3789$ А; е) $h = 65\%$, $I_{ef} = 1929$ А; ф) $h = 65\%$, $I_{ef} = 2956$ А; г) $h = 65\%$, $I_{ef} = 3566$ А

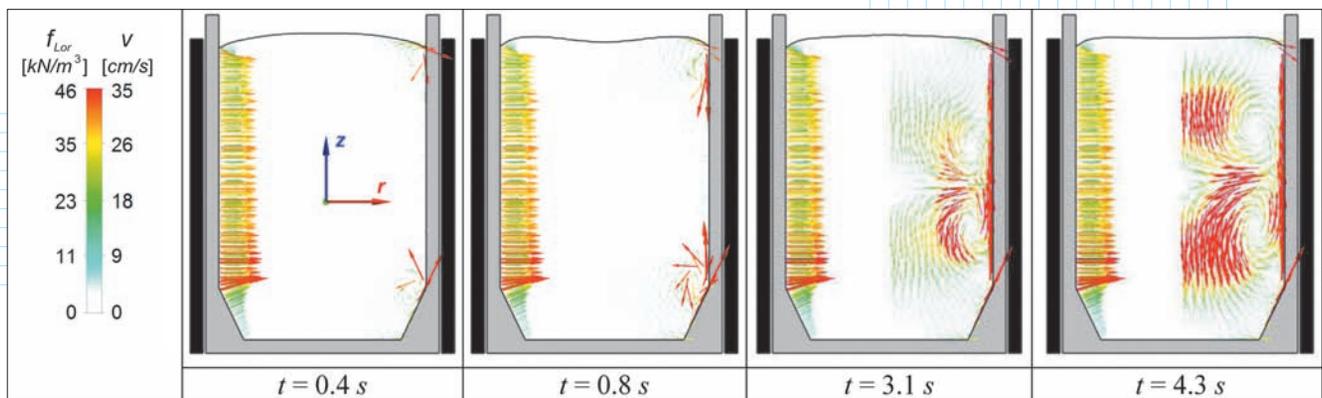


Рис. 2. Результаты расчетов для 2D-модели крупногабаритной промышленной ИТП: распределение плотности силы Лоренца (слева), циркуляция расплава (справа) и динамика свободной поверхности в различные моменты времени

свободной поверхности расплава T зависит только от геометрии тигля

$$T_{theor} = 2\pi \sqrt{\frac{r_0}{\lambda_1 \cdot g}} \cdot \tan\left(\frac{\lambda_1 \cdot h_0}{r_0}\right) \quad (7)$$

где r_0 – радиус тигля, h_0 – начальное заполнение и $\lambda_1 = 3.83$ – первый корень функции Бесселя J_1 .

Для проверки результатов расчета динамики свободной поверхности, полученных с помощью разработанной авторами модели, рассматривалась использованная в [8] промышленная ИТП с тиглем, уже заполненным жидким алюминием. Предполагалось также, что в начальный момент времени $t = 0$ s печь мгновенно достигает своего рабочего состояния.

Результаты нестационарных 2D-расчетов для распределения плотности силы Лоренца, картины течения расплава и формы свободной поверхности в выбранные моменты времени показаны на рис. 2.

Динамика профиля свободной поверхности на рис. 3a демонстрирует регулярные колебания свободной поверхности и показывает, что различие между периодами колебаний, полученными в результате численных расчетов ($T_{calc} = 0.68$ s) и с помощью аналитического выражения (7) ($T_{theo} = 0.676$ s), составляет менее 1%.

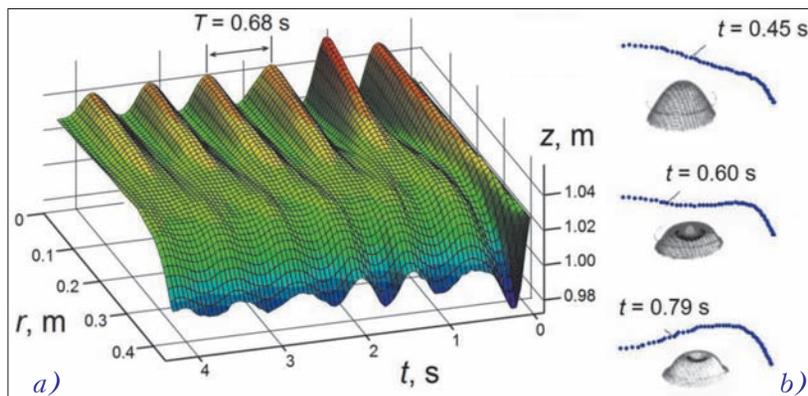


Рис. 3. 2D-модель крупногабаритной промышленной ИТП: а) динамика свободной поверхности расплавленного алюминия; б) сравнение характерной формы мениска с результатами расчетов из [8]

Кроме того, рассчитанные авторами мгновенные формы свободной поверхности качественно согласуются с численными результатами [8] (рис. 3б).

✓ Изучение параметров, влияющих на левитацию расплава в ЭМ-поле

Для плавки металлических материалов при высокой температуре с целью обеспечения высокой степени чистоты уже достаточно давно придуман бесконтактный метод, когда расплав поддерживается в состоянии левитации с помощью ЭМ-поля. Например, поведение и условия левитации образца из расплавленного алюминия ($m = 21.5$ g) в ЭМ-поле экспериментально исследовалось в [9]. В лабораторной установке применялись питаемые переменным током две системы витков со встречным направлением токов (рис. 4a).

Численное моделирование условий эксперимента в аксиально-симметричной 2D-постановке выполнено авторами статьи [3] с использованием собственного программного обеспечения. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментально наблюдаемой формой капли, напоминающей “вращающийся волчок”, а течение расплава является турбулентным с циркуляцией в виде двух тороидальных вихрей (рис. 4b). (V.Bojarevics любезно предоставил авторам результаты своих расчетов для эксперимента, выполненного E.C.Okress, чтобы мы могли сравнить их с результатами своих расчетов.)

Упомянутый эксперимент полностью воспроизведен в разработанной авторами модели в двух вариантах: 2D аксиально-симметричном (рис. 4c) и 3D (рис. 4a). Полученные авторами данные моделирования для структуры течения, силы Лоренца и формы капли хорошо согласуются с данными, приведенными в реферируемых публикациях других авторов.

На основе разработанной численной 2D-модели, воспроизводящей условия эксперимента E.C. Okress [9] (рис. 4a), проведена серия расчетов стационарной

формы свободной поверхности. Полученные результаты демонстрируют влияние вязкости расплава и эффективного значения тока в индукторе на форму капли, находящейся в состоянии левитации (рис. 5). Для сравнения приведем также параметры, использованные в эксперименте:

- коэффициент поверхностного натяжения $\gamma = 0.94 \text{ N/m}$;
- плотность расплава $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$;
- частота переменного тока $f = 9.8 \text{ kHz}$;
- эффективное значение тока в индукторе $I_{ef} = 0.6 \text{ kA}$.

Результаты расчетов показывают, что в случае левитации капли в аксиально-симметричном вертикальном ЭМ-поле для исследованного диапазона параметров сила Лоренца на оси симметрии имеет точку

с нулевым значением (такую точку назовем особой), расположенную в самой нижней точке капли. В особой точке возможно вытекание расплава из капли, поскольку этому процессу может воспрепятствовать только лишь одна сила – поверхностное натяжение. Этим объясняется ограничение на массу капли.

Поскольку достижение промышленно-значимых объемов выплавляемого в состоянии левитации металла требует увеличения массы капли, представляется целесообразным рассмотреть горизонтального ЭМ-поля.

✓ Левитация в горизонтальном одночастотном ЭМ-поле

Следующий этап верификации разработанной модели связан с экспериментальными исследованиями

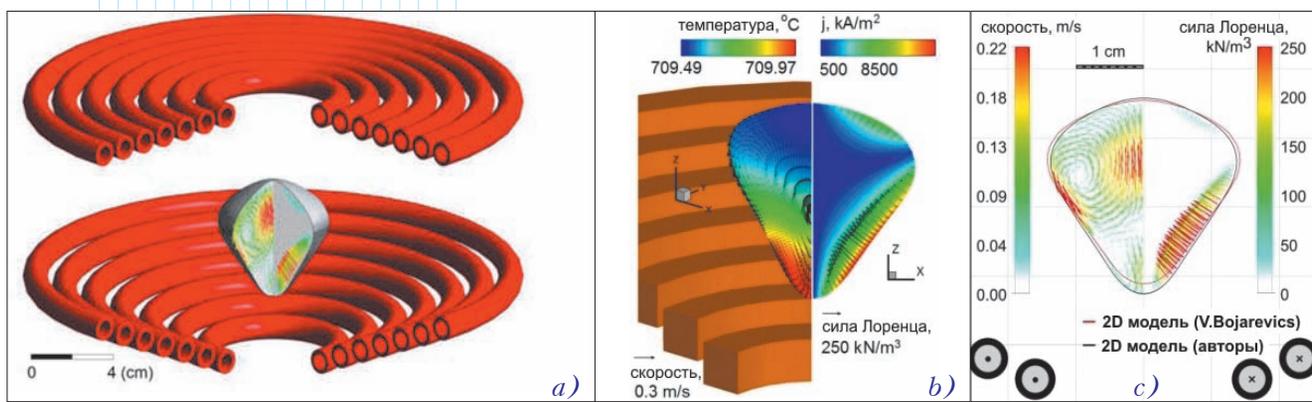


Рис. 4. а) Воспроизведенная в 3D-модели авторов геометрия плавильной печи с левитацией расплава из эксперимента, выполненного Е.С. Окресс. Сравнение результатов расчетов, полученных V. Vojarevics (b) и авторами (c)

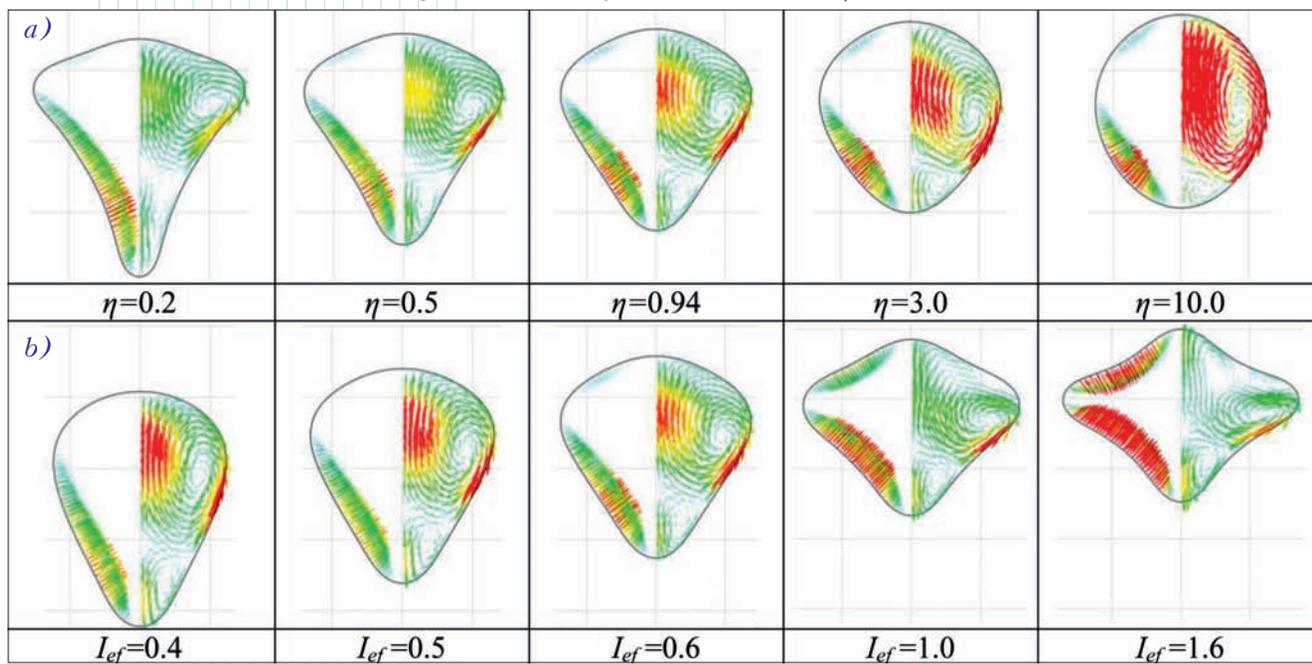


Рис. 5. Стационарная форма свободной поверхности, сила Лоренца ($0 \div 0.35 \text{ MN/m}^3$, слева) и циркуляция расплава ($0 \div 22 \text{ cm/s}$, справа), рассчитанные для условий эксперимента Е.С. Окресс по ЭМ-левитации капли расплава для различных значений: а) коэффициента поверхностного натяжения η [N/m]; б) эффективного значения тока в индукторе I_{ef} [kA]

О. Pesteanu и результатами проведенного им моделирования на основе стационарной 2D-модели для устройства левитации расплава алюминия в одночастотном ЭМ-поле [10]. Конструкция устройства включает ферритовый магнитопровод и медный индуктор с 16-ю витками. Кварцевая трубка, помещенная в воздушный зазор между торцевыми поверхностями магнитопровода и витками индуктора, предотвращает нежелательный контакт расплава с элементами конструкции устройства. В случае отсутствия у магнитопровода выступов положение алюминиевого образца не является стабильным, и он смещается к стенке кварцевой трубки (рис. 6a). Для достижения стабилизации образца путем изменения распределения ЭМ-поля в зазоре в конструкцию магнитопровода введено четыре дополнительных выступа, изготовленных из материала FLUXTROL (рис. 6b).

При численном моделировании расчеты начинались со сферической формы капли и нулевых значений скорости расплавленного алюминия, а капля помещалась на несколько миллиметров выше позиции, наблюдаемой в эксперименте.

Форма капли, наблюдаемая в эксперименте (рис. 7a), хорошо согласуется со стационарной формой капли, полученной в результате расчетов (рис. 7b). Сравнение результатов 3D-расчетов, выполненных авторами, с результатами эксперимента и 2D-расчетов О. Pesteanu приведено на рис. 8.

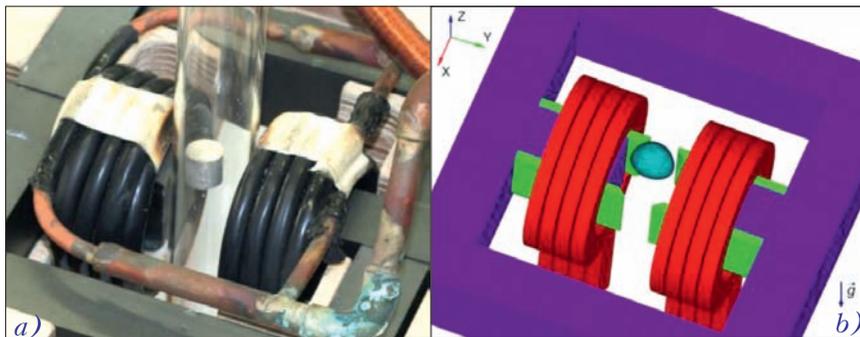


Рис. 6. а) ЭМ-левитация твердого алюминиевого цилиндра, касающегося стенок кварцевой трубки, в одночастотной экспериментальной установке без дополнительных выступов магнитопровода. б) Расчетная модель установки с модифицированной конструкцией, в которую добавлены выступы магнитопровода (отмечены зеленым цветом) для стабилизации капли расплавленного алюминия

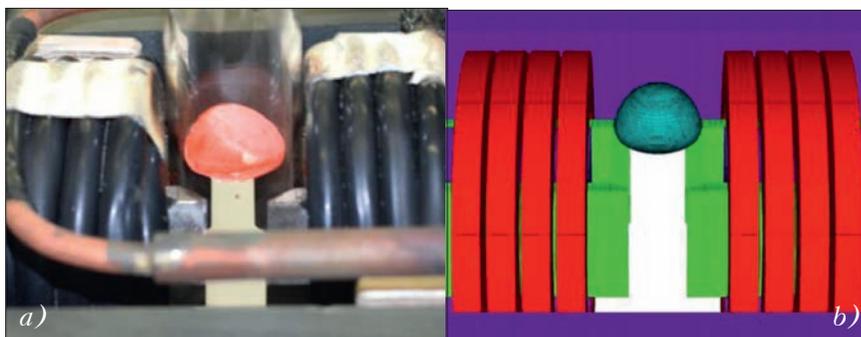


Рис. 7. Качественное сравнение экспериментально наблюдаемой [11] (а) и рассчитанной (б) формы свободной поверхности капли расплава в одночастотном устройстве ЭМ-левитации

Следует отметить, что форма капли, полученная с помощью каждой из двух моделей, хорошо согласуется с экспериментом.

Переменный ток в индукторе создает переменное магнитное поле, которое из-за большой магнитной проницаемости феррита сконцентрировано, главным образом, в магнитопроводе. В воздушном зазоре силовые линии магнитного поля замыкаются между торцами магнитопровода и из-за выраженного скин-эффекта ($\delta_{EM} = 1.55 \text{ mm}$) “обтекают” алюминиевую каплю. В зоне, где силовые линии магнитного поля отделяются от поверхности капли (из-за малого значения компоненты индукции магнитного поля, параллельной свободной поверхности) наблюдается минимум силы Лоренца. Максимум силы Лоренца имеет место в нижней части капли, где у магнитной индукции более высокие значения и превалирует компонента поля, направленная вдоль свободной поверхности. Такое распределение силы Лоренца (рис. 8) способствует увеличению размеров капли вдоль силовых линий магнитного поля. В то же время радиус кривизны свободной поверхности, где силовые линии магнитного поля отделяются от капли, становится достаточно малым, и это приводит к тому, что растущий вклад поверхностного натяжения останавливает увеличение размеров капли в горизонтальном направлении.

В случае больших объемов капли, находящейся в состоянии левитации, конфигурация одночастотного горизонтального ЭМ-поля будет способствовать увеличению размера капли вдоль силовых линий магнитного поля. В то же время горизонтальные размеры капли ограничены диаметром кварцевой трубки, а также расстоянием между торцами индуктора и магнитопровода.

Для увеличения массы капли, находящейся в состоянии левитации в ЭМ-поле, может быть задействовано дополнительное горизонтальное ЭМ-поле, направление которого перпендикулярно имеющемуся горизонтальному ЭМ-полю [11]. Результаты численного 3D-моделирования циркуляции расплава и динамики свободной поверхности в двухчастотной установке левитации капли ($m = 30 \text{ g}$) в ЭМ-поле хорошо согласуются с экспериментом [12].

В настоящее время разработанный численный подход применяется для проектирования установки, обеспечивающей устойчивую левитацию в ЭМ-поле расплава алюминия массой 1 kg .

Выводы

Разработан новый универсальный подход для сопряженного 3D-моделирования циркуляции

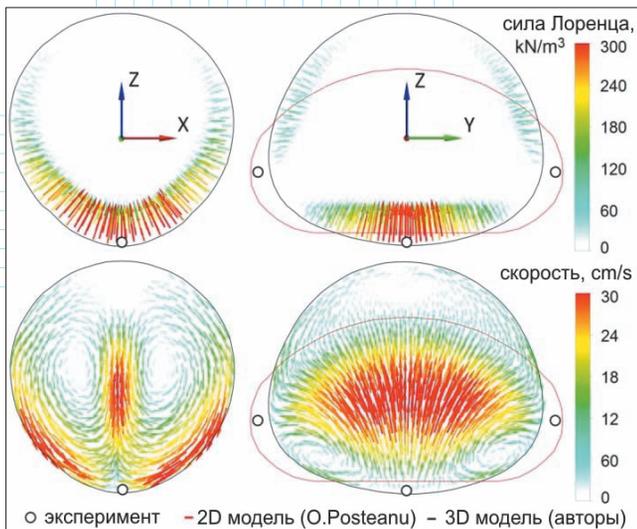


Рис. 8. Результаты 3D-расчетов силы Лоренца, циркуляции расплава и формы свободной поверхности в сравнении с результатами 2D-расчетов и экспериментов, полученными О. Pesteanu

жидкого металла, динамики свободной поверхности и ЭМ-поля. Численная методика настроена на решение задач левитации расплава в ЭМ-поле и может быть использована в сочетании с LES-моделью турбулентности. Следующий этап связан с дополнением алгоритма сопряженного моделирования модулями для решения задач теплопереноса и кристаллизации.

Сравнение численных результатов, полученных авторами, с экспериментальными данными и результатами для стационарной формы свободной поверхности в случае применения других моделей индукционных печей и установок для левитации в ЭМ-поле, а также сравнение численно рассчитанного периода колебаний свободной поверхности с аналитическими оценками, продемонстрировало хорошее согласование результатов, что подтверждает точность разработанной авторами модели.

Предложенный О. Pesteanu новый метод левитации в ЭМ-поле с большей массой и стабилизированной позицией расплава – метод, устраняющий причины распада расплава на несколько капель, а также вытекание части расплава из капли, находящегося в состоянии левитации – подтвержден расчетами на основе разработанной авторами модели.

С помощью разработанного авторами подхода ведется проектирование инновационной установки с конфигурацией ЭМ-поля, обеспечивающей устойчивую левитацию промышленно-значимых объемов расплавленного металла. Работоспособность проектируемой установки проверяется натурными экспериментами на создаваемом опытном образце.

В заключение авторы хотели бы отметить вклад О. Pesteanu (1945–2012 гг.) в разработку инновационной технологии левитации в горизонтальном ЭМ-поле, а также выразить благодарность за его поддержку и участие в проведенном исследовании.

Авторы:

Mg.Sc.Phys. Сергей Спитан, докторант физико-математического факультета Латвийского университета (г. Рига); сотрудник Института электротехнологий Университета Вильгельма Лейбница (г. Ганновер, Германия) – spitans@etp.uni-hannover.de.

Dr.Sc.Ing. Эгберт Баак (Egbert Baake), профессор Института электротехнологий Университета Вильгельма Лейбница – baake@etp.uni-hannover.de.

Dr.Phys. Андрис Якович, заведующий кафедрой электродинамики и механики сплошных сред физико-математического факультета Латвийского университета – andris.jakovics@lu.lv.

Dr.Phys. Сергей Павлов, ведущий научный сотрудник Лаборатории математического моделирования окружающей среды и технологических процессов Латвийского университета – sergejs.pavlovs@lu.lv; редактор журнала “CAD/CAM/CAE Observer” – sergey@cadcamcae.lv.

Литература

- Baptiste L., van Landschoot N., Gleijm G., Priede J., van Westrum J.S., Velthuis H., Kim T.-Y. *Electromagnetic levitation: A new technology for high rate physical vapour deposition of coatings onto metal strips*. Surface & Coatings Technology, 2007, Vol. 202, pp. 1189–1193.
- Kirpo M. *Modelling of turbulence properties and particle transport in recirculated flows*. Ph.D. Thesis, University of Latvia, Riga, 2008, 184 p.
- Bojarevics V., Harding R., Pericleous K., Wickins M. *The development and experimental validation of a numerical model of an induction skull melting furnace*. Metallurgical and Materials Transactions B, 2004, Vol. 35, pp. 785–803.
- Easter S., Bojarevics V., Pericleous K. *Numerical modelling of liquid droplet dynamics in microgravity*. Journal of Physics: Conference Series, 2011, Vol. 327, #012027.
- Spitans S., Jakovics A., Baake E., Nacke B. *Numerical modelling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field. Part I. Implementation and verification of model*. Metallurgical and Materials Transactions B, 2013, Vol. 44, No. 3, pp. 593–605.
- Spitans S., Jakovics A., Baake E., Nacke B. *Numerical modelling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field*. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, Vol. 19, Supplement 1, pp. 531–535.
- Westphal E. *Elektromagnetisches und thermisches Verhalten des Kaltwand-Induktions-Tiegelöfens*. Doktor-Ingenieur Dissertation. Dusseldorf, 1996, VDI Reihe 21, Nr. 210, 138 S.
- Hegewaldt F., Buligins L., Jakowitsch A. *Transient bath surface bulging at energization of an induction-type crucible furnace*. Elektrowärme International, 1993, Vol. 1, pp. 28–42.
- Okress E.C., Wroughton D.M., Comenetz G., Brace P.H., Kelly J.C.R. *Electromagnetic levitation of solid and molten metals*. Journal of Applied Physics, 1952, Vol. 23, pp. 545–552.
- Pesteanu O., Baake E. *The multicell VOF method for free surface simulation of MHD flows. Part I. Mathematical model. Part II: Experimental verifications and results*. ISIJ International, 2011, Vol. 51, No. 5, pp. 707–721.
- Pesteanu O., Baake E. *New method and devices for electromagnetic drip and leakage-free levitation melting*. ISIJ International, 2012, Vol. 52, No. 5, pp. 937–938.
- Baake E., Spitans S., Jakovics A. *New technology for electromagnetic levitation melting of metals*. Proceedings of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources (HES-13, May 21–24, 2013). Padua (Italy), 2013, Addendum, pp. 1–8.