

УДК 669.187.2

ДЕФОРМАЦИИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАПЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ

П. Шапель, А. Жарди, Д. Аблизер,
Ю. М. Помарин, Г. М. Григоренко

Описаны экспериментальные и численные исследования формы и переходной (неустановившейся) деформации свободной поверхности жидкой капли сплава 80 % Ni–20 % Cr во время левитационной плавки. С использованием скоростной визуализации и обработки изображений определены частоты колебания свободной поверхности капли. Установлено, что изменения температуры металла в диапазоне 1650... 1750 °С оказывают незначительное влияние на эти частоты и среднюю форму капли. Представлена двумерная модель переходного процесса, учитывающая полностью связанный характер электромагнитных явлений, турбулентное течение жидкого металла в капле и изменения формы капли. Показано, что результаты моделирования, полученные на основе оценки тока в катушке, позволяют достаточно точно прогнозировать среднее положение и форму капли, обнаруженные во время эксперимента.

Experimental and numerical investigations of shape and transient (non-steady) deformation of a free surface of a molten drop of alloy 80 % Ni–20 % Cr during the levitation melting were described. Using a high-speed visualization and processing of images, the frequencies of oscillation of a drop free surface were determined. It was found that the change in metal temperature in the range of 1650... 1750 °C has a negligible influence on these frequencies and medium shape of the drop. Two-dimensional model of transient process is presented, accounting completely for interlinked nature of electromagnetic phenomena, turbulent flow of molten metal in a drop and change in the drop shape. It is shown that the results of modeling obtained on the basis of estimation of current in a coil, allow predicting sufficiently precisely the middle position and shape of drop revealed during the experiment.

Ключевые слова: электромагнитная левитация, свободная поверхность, скоростная видеосъемка, числовое моделирование

Введение. Понимание механизмов массопереноса и реакций между жидким металлом и газовой фазой имеет большое значение для оптимизации некоторых металлургических процессов, включая дегазацию сталей и сплавов. Для исследования реакций между газом и жидким металлом наиболее подходящим является лабораторный способ взвешенной капли [1], который заключается в плавлении и левитации металлического образца в катушке, питаемой переменным током высокой частоты. Применение электромагнитной левитации для исследования реакций между газом и жидким металлом обеспечивает создание среды, не содержащей загрязнителей, без использования тигля или подложки; получение большой контактной поверхности и эффективное перемешивание жидкого металла, что способствует быстрому достижению равновесия в системе газ–жидкость.

Способ взвешенной капли используется в ИЭС им. Е. О. Патона для исследования азотирования и деазотирования различных жидких металлических сплавов, включая химически активные (титан, цирконий, хром) и хромоникелевые сплавы (например, суперсплавы на основе никеля). Эксперимент по левитации заключается в воздействии при постоянной температуре на взвешенный образец расплава потока газообразного азота в течение контролируемого периода времени. Содержание газа в металле определяют различными способами после затвердевания образца. Такие эксперименты позволяют установить растворимость газа в металле при заданной температуре, а также получить данные о кинетике общего реактивного перехода азота на границе раздела газ–жидкий металл.

Однако полученных экспериментальных данных недостаточно для точного определения предельного значения переноса азота. Поэтому параллельно в Горной школе (Нанси) проведено числовое моделирование эксперимента со взвешенной каплей, основной целью которого было установление возможности прогнозирования изменения содержа-



ния азота в металлическом образце в зависимости от времени в процессах азотирования и деазотирования. Для этого требовалось смоделировать поток жидкого металла в капле под воздействием электромагнитных сил. Данный подход уже обеспечил достаточно четкое описание поведения азота в эксперименте Сиверта [2].

Еще один важный аспект в описании общего массопереноса между каплей и окружающим газом заключается в определении геометрии взвешенной капли, что в свою очередь способствует определению межфазной поверхности. Основное внимание в данной работе уделяли именно этому последнему аспекту, исследование которого послужило первым этапом в построении полной модели эксперимента по левитации. При этом скоростную визуализацию совмещали с моделированием методами вычислительной гидродинамики для определения и прогнозирования формы, а также переходной деформации свободной поверхности капли. Изучали также влияние температуры металла на деформацию капли.

Описание эксперимента. На рис. 1 представлена экспериментальная установка. Опыты производили в кварцевой трубке диаметром 17,4 мм. Вокруг трубки устанавливали индукционную катушку из шести витков, при этом сверху были размещены два встречных витка. Питание катушки обеспечивалось генератором частотой 66 кГц и выходной мощностью 7 кВт. В данной работе использовали сплав 80 % Ni–20 % Cr.

Образцы массой приблизительно 1 г имели исходный диаметр 3 мм. Движение и форму взвешенного образца регистрировали при помощи скоростной видеокамеры (1000 кадр/с, 768×768 пикселей), размещенной перед установкой для левитации. Сбоку под углом 45° установили зеркало для одновременной визуализации фронтальной и поперечной поверхностей образца. Это позволило получить некоторую информацию о трехмерных геометрических характеристиках капли.

Температуру поверхности жидкого металла измеряли пирометром, помещенным над образцом. Эксперименты проводили при значениях температуры 1650, 1700 и 1750 °С. В процессе плавления вокруг образца поддерживали атмосферу инертного газа (аргона) для предотвращения попадания примесей в жидкий металл вследствие реакции с окружающим воздухом.

С целью количественного определения геометрии и динамики взвешенной капли использовали фирменную компьютерную программу, разработанную для последующей обработки видеоизображений, которая позволяет автоматически определять края капли на каждом цифровом изображении, а также рассчитывать площадь и координаты центра тяжести на поверхности, ограниченной указанными краями (т. е. кажущееся поперечное сечение капли в плоскости наблюдения). Затем выполняли спектральный анализ развития последних параметров

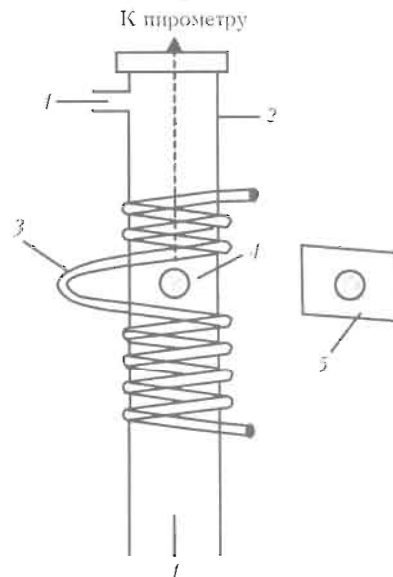


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — газ; 2 — кварцевая трубка; 3 — обратный виток индукционной катушки; 4 — жидкая капля; 5 — зеркало под углом 45°

во времени для определения характеристических частот динамики системы.

Взвешенная капля отличается сложными динамическими характеристиками. Форма капли сильно искажается, по сравнению со сферической. Капля подвергается непрерывным колебаниям на свободной поверхности, а также периодическим поступательным перемещениям в нескольких направлениях относительно равновесного положения и (в определенных условиях) вращения. В данном разделе представлены основные результаты нашего исследования характеристик свободной поверхности.

На рис. 2 дан пример временных изменений на фронтальной и поперечной поверхностях сечения капли. Также приведены видеоизображения фронтальной и поперечной поверхностей капли в различные моменты времени. На фронтальном изображении отсутствует нижняя часть капли, что обусловлено блокировкой изображения катушкой. Эксперимент проводили при температуре 1700 °С. Площади поперечного сечения со временем быстро изменялись, при этом колебания изображений фронтальной и поперечной поверхностей не совпадали по фазе. Амплитуда колебаний имела только относительное значение. Такие колебания площади поперечного сечения отражают колебания свободной поверхности капли, вызванные силами поверхностного натяжения, влиянием магнитного давления и конвекцией жидкого металла. Спектральный анализ колебаний (с учетом 3000 кадров) показал наличие подобного доминирующего пика при частоте приблизительно 39 Гц на изображениях фронтальной и поперечной поверхностей.

Следует отметить, что изучение частотного спектра показало наличие серии частотных пиков, расположенных близко друг к другу и равных примерно 39 Гц (по 8 пиков для изображений фронтальной и поперечной поверхностей). Множество таких пиков свидетельствует о сложной динамике колебаний капли.

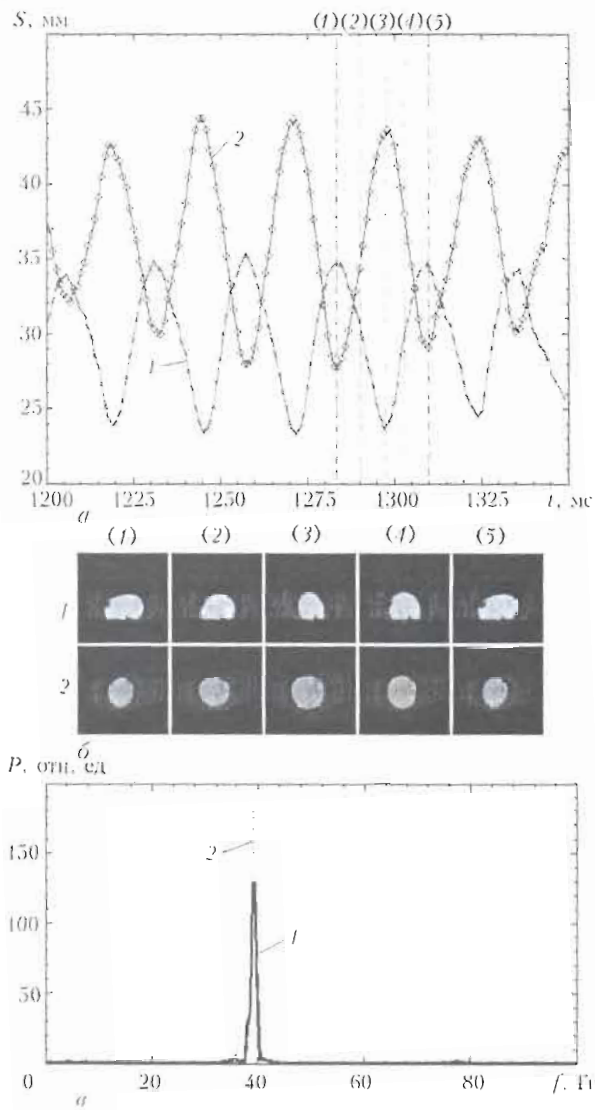


Рис. 2. Фронтальное и поперечное сечения капли в зависимости от мощности P : a — изменения колебаний со временем; b — видеоизображения в различные моменты времени; c — энергетические спектры колебаний Фурье; 1 — вид сбоку; 2 — вид спереди; (1)–(5) — форма капли в разные моменты времени

Как видно из рис. 2, мгновенная геометрия капли сильно отличается от сферической и является несимметричной. Сечения фронтальной и поперечной поверхностей можно аппроксимировать как эллиптические. В полупериоде большая ось фронталь-

Таблица 1. Влияние температуры металла на частоту колебаний площади поперечного сечения капли

Температура металла, °C	Частота колебаний, Гц, при сечении	
	фронтальном	поперечном
1650	40,5	40,5
1700	37,7	37,5
1750	39	39

Примечание. Данные при температурах 1650 и 1700 °C представляют собой средние значения двух серий измерений.

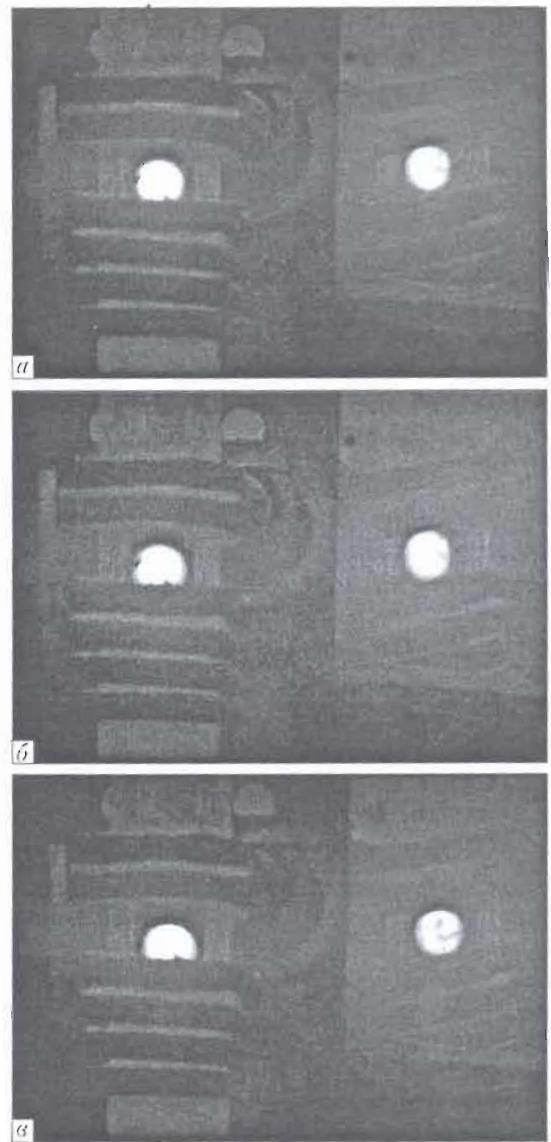


Рис. 3. Влияние температуры T металла на среднюю форму капли (слева — вид фронтальной поверхности; справа — вид поперечной поверхности): a — 1650; b — 1700; c — 1750 °C

ного сечения колеблется между двумя взаимно перпендикулярными направлениями.

В табл. 1 даны измеренные значения частоты колебаний площади сечения при трех различных значениях температуры жидкого металла. Следует отметить, что для температуры 1650 и 1700 °C они представляют собой усредненные результаты по двум сериям измерений. Как видно из табл. 1, в ограниченном диапазоне исследований температура не имеет существенного значения. Разброс результатов находится в пределах экспериментальной неопределенности.

На рис. 3 приведены видеоизображения фронтальной и поперечной поверхностей капли при трех различных значениях температуры, усредненные по нескольким периодам колебаний площади поперечного сечения, которые получены путем усреднения 400 последовательных кадров (соответствующих временному периоду 0,4 с).

Интересно отметить, что после усреднения фронтальные и поперечные поверхности капли ста-



новятся похожими друг на друга так, что средняя геометрия капли относительно близка к осесимметричной. Установлено, что в исследованном температурном диапазоне температура не воздействует заметно на среднюю форму капли, в отличие от ощутимого влияния на среднее положение капли. С повышением температуры уменьшается высота капли в катушке (рис. 3), что объясняется снижением мощности питания катушки при возрастании температуры (7,5; 6,9; и 6,0 кВт соответственно при 1650, 1700 и 1750 °С).

Числовое моделирование. Моделирование поведения взвешенных электромагнитным способом капель является предметом многих исследований с применением различных аналитических и численных методов. При этом актуальной задачей является комплексное описание системы, включающее связь между электромагнитным полем, изменением формы жидкого металла и потока жидкости в капле.

Большинство исследований посвящено определенным ограниченным аспектам данной проблемы и основано на использовании некоторых упрощающих допущений, в частности, только в некоторых из них учитывается динамическое воздействие потока расплава на форму свободной поверхности [3–5]. Наиболее важной в данной области является недавняя работа Бояревича и Периклеуса (Bojarevics and Pericleous [5]), где описана модель при помощи которой рассчитаны с применением спектральных методов решения тепловые поля и поля потоков в осесимметричной взвешенной капле одновременно с колебаниями свободной поверхности.

Описание модели. Указанная модель описывает осесимметричную каплю жидкого металла. Как следует из предыдущего раздела, предположение осесимметричности не полностью отражает реальность. Однако считается, что для исследования эффектов первого порядка достаточно двумерного расчетного анализа. Наш основной интерес заключается в прогнозировании переходных изменений в форме капли. Модель описывает следующие три аспекта:

- расчет распределения электромагнитного поля, полученного с применением катушки индуктивности внутри и снаружи капли, а также распределение сил Лоренца, действующих на жидкую каплю;

- определение турбулентного потока жидкого металла, образовавшегося в капле под воздействием сил Лоренца;

- анализ деформации формы свободной поверхности капли.

В частности, предлагаемая модель учитывает влияние как электромагнитного поля, так и динамики внутренних потоков в капле на форму ее свободной поверхности. В качестве первого шага при разработке полной модели, поскольку предполагается, что капля является изотермической, не учитывают явления тепло- и массопереноса.

Расчет электромагнитной силы. Электромагнитная сила в жидкой капле обусловлена взаимодействием

между током и магнитным полем. Последнее определяется векторным потенциалом \vec{A} ($\vec{B} = \nabla \vec{A}$), который в случае осесимметричности является полностью азимутальным ($\vec{A} = A_\theta \vec{e}_\theta$). Векторный потенциал должен удовлетворять следующему уравнению, выведенному из уравнений Максвелла (калибровочное условие кулоновского потенциала):

$$\nabla^2 A_\theta - \frac{A_\theta}{r^2} = \mu \sigma \frac{\partial A_\theta}{\partial t} - J_{ex}, \quad (1)$$

где μ — магнитная проницаемость; σ — электропроводность металла; J_{ex} — плотность тока, циркулирующего в катушке. Следует отметить, что конвекционный член, связанный со скоростью потока ($\vec{A} \cdot \nabla$), не учитывается в данном уравнении, что оправдано ввиду довольно высоких частот. В случае синусоидального тока значения поля удобно выразить с использованием понятия вектора. Например, векторный потенциал представлен сложной экспоненциальной функцией $A_\theta e^{j\omega t}$, где сложная амплитуда A_θ имеет только пространственную зависимость, и ω является угловой частотой.

С учетом понятия вектора уравнение (1) можно переписать, используя сложную амплитуду:

$$\nabla^2 A_\theta - \frac{A_\theta}{r^2} = j\mu\sigma\omega A_\theta - J_{ex}. \quad (2)$$

Разложение указанного уравнения на реальные и мнимые части дает два связанных уравнения диффузионного переноса для реальной ($A_\theta = \text{Re}(A_\theta e^{j\omega t})$) и мнимой части ($\text{Im}(A_\theta e^{j\omega t})$) сложного векторного потенциала.

С учетом решения для A_θ плотность наведенного тока в жидкой капле J_θ можно определить путем сочетания уравнения Максвелла-Фарадея и закона Ома:

$$J_\theta = -j\sigma\omega A_\theta. \quad (3)$$

И, наконец, получаемая в результате электромагнитная сила, действующая на жидкий металл и усредненная во времени за период переменного тока, определяется как

$$\vec{F} = \langle \vec{J} \cdot \vec{B} \rangle = 1/2 \text{Re}(\vec{J}_\theta \vec{B}^*), \quad (4)$$

где верхний индекс * обозначает комплексно сопряженное число. Следует отметить, что переменную часть электромагнитной силы можно не учитывать, поскольку временной масштаб, связанный с инерцией жидкого металла, намного больше частоты тока катушки.

Моделирование потока. Явления течения описываются с помощью уравнений турбулентности Навье-Стокса. Вопрос выбора соответствующей модели турбулентности для систем взвешенных капель все еще остается открытым, поэтому применение тра-



Таблица 2. Выражения коэффициента диффузии Γ_ϕ и главного члена S_ϕ в уравнении (5) для различных переменных ϕ

Параметры	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Сплошная среда	1	0	0
Сохранение количества движения (радиальное)	u_r	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial u_z}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\mu_{eff} \frac{\partial u_r}{\partial r}) - 2\mu_{eff} \frac{u_r}{r^2} + \rho \frac{u_\theta^2}{r} + F_r$
Сохранение количества движения (осевое)	u_z	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial u_z}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\mu_{eff} \frac{\partial u_r}{\partial z}) + \rho_0 g + F_z$
Сохранение количества движения (азимутальное)	u_θ	μ_{eff}	$-\frac{u_\theta}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(r\mu_{eff}) - \rho \frac{u_r u_\theta}{r}$
Сохранение k	K	μ_{eff}/α_k	$G_k - \rho \epsilon$
Сохранение ϵ	e	$\mu_{eff}/\alpha_\epsilon$	$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon$

диционной модели турбулентности RANS (типа $k-\epsilon$ или $k-\omega$), хотя о ней чаще всего сообщается в литературе, вызывает сомнения. В данной работе мы использовали известную версию ренормализационной группы (RNG) модели $k-\epsilon$, следуя рекомендациям, приведенным в работах [4, 6] и др., где на основе сравнительных численных исследований сделан вывод о преимуществах модели RNG над стандартной моделью $k-\epsilon$ для описания внутреннего течения во взвешенной капле. Уравнения Навье-Стокса и переноса турбулентности можно записать в общем виде с помощью уравнения конвекции-диффузии для переменной величины ϕ , которое имеет следующий вид в системе осесимметричных цилиндрических координат (r, θ, z) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z \phi) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_\phi. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражения коэффициента диффузии Γ_ϕ и старшего члена S_ϕ даны в табл. 2 для каждой переменной потока. Здесь μ_{eff} — эффективная динамическая вязкость, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, где μ и μ_t — соответственно молекулярная и турбулентная динамическая вязкость; F_r и F_z — радиальный и осевой компоненты электромагнитной силы в жидком металле; g — сила тяжести.

Турбулентную вязкость можно выразить через турбулентную энергию k , а скорость ее рассеяния ϵ можно описать следующим отношением:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}. \quad (6)$$

В случае закрученного потока модель RNG $k-\epsilon$ корректирует вязкость, данную в уравнении (6), с помощью весового коэффициента в виде $f(\Omega, k/\epsilon)$, где Ω — угловая скорость жидкой среды.

Член S_k , представляющий собой образование турбулентной кинетической энергии под воздействием градиентов скорости, выражен через функцию модуля тензора средней скорости деформации S

$$G_k = \mu_{eff} S^2. \quad (7)$$

Основное изменение относительно стандартной модели $k-\epsilon$, за исключением коррекции турбулентной вязкости, заключается в наличии дополнительного члена R_ϵ в уравнении переноса скорости рассеяния ϵ :

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (8)$$

где $\eta = S \frac{k}{\epsilon}$, $\eta_0 = 4,38$, $\beta = 0,012$.

Все указанные константы модели турбулентности ($C_\mu, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, \alpha_k, \alpha_\epsilon$) принимаются равными рекомендованным значениям, приведенным в руководстве для пользователя [7].

Расчет деформации свободной поверхности. Для представления и прослеживания перемещения свободной поверхности капли используется известный метод VOF (объема жидкости). Впервые введенный Хертом и Николсом [8], он представляет собой метод поверхностного захвата, в котором используется фиксированная сетка Эйлера. Положение границы раздела между жидким металлом и окружающим газом описывается с использованием локальной функции F , представляющей собой объемную долю ячейки сетки, занятую металлом. Величина F равна единице в любой ячейке, заполненной металлом, 0 — в любой ячейке, заполненной газом, от 0 до 1 — в любой ячейке, содержащей границу раздела.

Перемещение границы раздела прослеживается путем решения уравнения чистой адвекции для объемной доли:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r u_r F) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z F) = 0. \quad (9)$$

Восстановление границы раздела по информации о поле объемной доли выполняется методом кусочно-линейного расчета границы раздела Юнга [9]. Для металла и газа используют один набор уравнений. В расчетных ячейках, содержащих свободную поверхность, физические свойства смеси

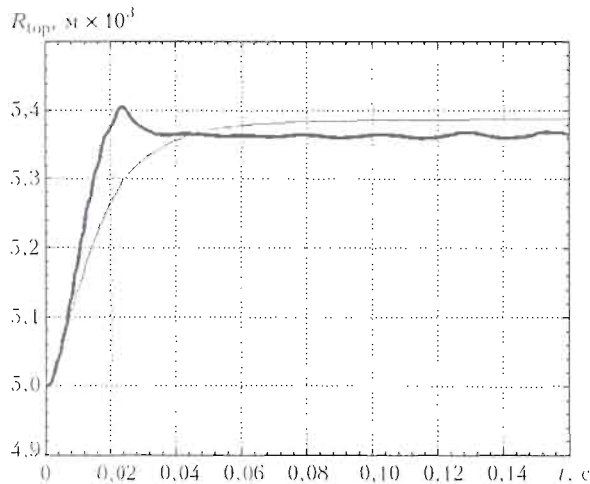


Рис. 4. Расчетные изменения во времени координаты z верхней центральной поверхности взвешенной капли в одном токовом контуре и сравнение с результатами моделирования Бояревича [12]: 1 — модель, разработанная в данном исследовании; 2 — модель Бояревича

жидкостей (плотность, вязкость), появляющиеся в уравнениях, выражены в виде средних значений свойств компонентов смеси, взвешенных по объемной доле каждой жидкости. Эффекты поверхностного натяжения по границе раздела моделируют с использованием модели поверхностного натяжения сплошной среды (CSF), предложенной в работе [10], которая заключается в выражении поверхностного натяжения в виде объемной силы, добавленной к старшему члену в уравнении количества движения (импульса).

Числовые аспекты. Модель построена с применением версии 6,2 промышленной программы FLUENT, представляющей собой пакет программ вычислительной гидродинамики (CFD) на основе метода конечных объемов для моделирования многофазного потока жидкости. Решающая программа FLUENT дополнена набором определяемых пользователем функций (UDF), разработанным в Лаборатории EPM-Madylam (пакет Induct2D) для расчета электромагнитного поля и силы Лоренца с использованием формулировки потенциала вектора напряженности магнитного поля [11]. Для численного решения уравнений потока используют алгоритм SIMPLEC. Основное преимущество данного подхода заключается в возможности рассмотреть все аспекты проблемы в единой системе расчетов, что позволяет достичь полной связи и избежать возможных проблем, связанных с интерполированием, при переводе данных из одного кода в другой. Следует, однако, отметить, что необходимость в использовании сетки, которая простирается за пределы области металлической капли, может вызвать повышение стоимости расчетов, по сравнению с более специализированными методами расчетов электромагнитного поля и формы свободной поверхности капли, где применяется сетка, покрывающая только область капли.

Результаты. Адекватность модели вначале проверяют путем моделирования контрольного примера,

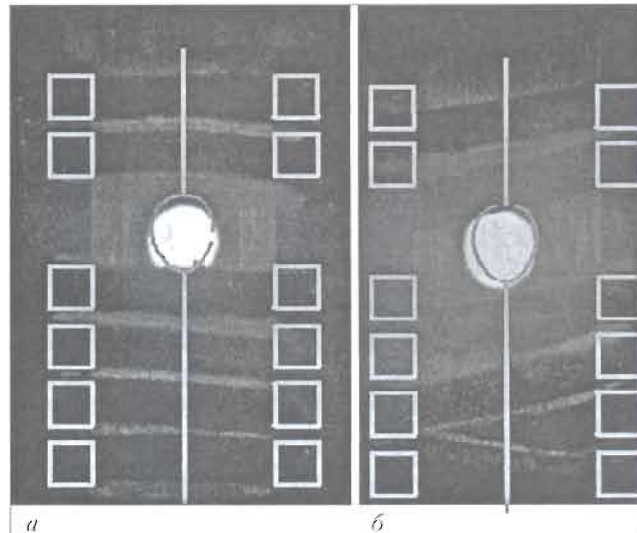


Рис. 5. Сравнение расчетной и экспериментальной равновесной форм взвешенной жидкой капли Ni-Cr в экспериментальной установке, показанной на рис. 1: а — вид спереди; б — вид сбоку; результаты моделирования получены при токе в катушке, равном 1250 А

рассчитанного в работе [12]. В этом контрольном примере рассматривается левитация капли алюминия радиусом 5 мм в условиях невесомости при использовании одного токового контура, расположенного в плоскости экватора. Эффективное значение тока в катушке составляет 200 А при частоте тока в катушке 9,6 кГц. Свойства материала идентичны указанным выше, за исключением вязкости, установленной равной искусственному высокому значению 2,38 кг/м·с, чтобы рассчитываемый поток оставался ламинарным. Электропроводность жидкого алюминия составляет $3,85 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Шаг времени выбирается равным 1 мкс, размер сетки в поверхностном электромагнитном слое составляет 90 мкм. Вначале металл в жидкой капле находится в состоянии покоя.

На рис. 4 показано развитие во времени координаты z в верхней центральной части капли. В начальной переходной фазе капля растягивается в осевом направлении. Затем форма капли стабилизируется и приобретает вид сплюсненного эллипсоида при $t = 32$ мс. Наши результаты согласуются с результатами, представленными в работе [12]. Конечная амплитуда деформации капли, предсказанная моделью, очень близка к амплитуде, рассчитанной в работе [12]. Однако следует отметить, что, согласно нашему моделированию, переходной этап оказывается несколько более коротким.

Модель использовали для имитации эксперимента по левитации, описанного ранее. Каплю хромоникелевого сплава помещали в условиях нормальной гравитации в катушке для левитации (рис. 1). Радиус капли составил 3,1 мм. Свойства материала были следующими: $\gamma = 1,75 \text{ Н/м}$, $\rho_l = 8400 \text{ кг/м}^3$, $\mu_l = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м} \cdot \text{с}$ и $\sigma = 1 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Вначале металлическая капля находилась в состоянии покоя. Шаг времени составлял 5 мкс, размер сетки в поверхностном электромагнитном слое равнялся 110 мкм. Важным входным параметром в мо-

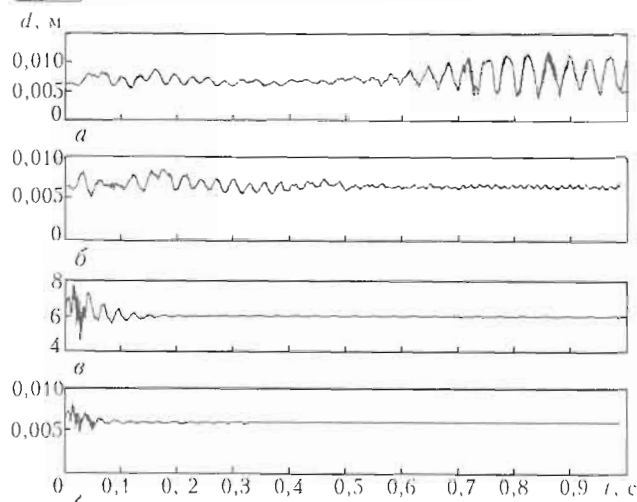


Рис. 6. Расчетные изменения во времени вертикального диаметра d капли при различных значениях тока в катушке, А: а — 1250; б — 2500; в — 5000; з — 5625

дели является реальный электрический ток, проходящий в катушке. К сожалению, этот параметр не определяется приборами установки, его невозможно измерить или рассчитать в ходе экспериментов.

На основании серии экспериментов с моделированием установлено, что для левитации капли ток в катушке должен составлять 1250...5625 А. Равновесную форму взвешенной капли, предсказанную моделью (для $I = 1250$ А), сравнивали (рис. 5) с видеоизображениями капли, записанными в ходе эксперимента. В этом случае было выбрано значение тока 1250 А, поскольку оно обеспечивает оптимальное соответствие экспериментальных и расчетных результатов. Расчетную равновесную форму получали путем усреднения различных форм капли, рассчитанных в течение первых 3 с моделирования. Видеоизображения являются результатом усреднения 400 кадров. Хорошее соответствие обнаружено между расчетной формой, фронтальным и поперечным сечениями капли, зафиксированное экспериментально. Модель также хорошо прогнозирует равновесную высоту капли.

Уровень тока оказывает большое влияние на колебания поверхности. Как показано на рис. 6, колебания поверхности капли происходят в двух различных режимах, в зависимости от тока в катушке. При низких значениях тока (1250 и 2500 А) капля продолжает колебаться по диаметру в течение длительного периода времени с различными амплитудами. Амплитуда этих колебаний увеличивается с повышением тока. При высоких значениях тока (5000 и 5625 А) начальные колебания быстро затухают и исчезают после 100...200 мс.

Выводы

1. Исследовали переходную деформацию жидкой взвешенной капли из сплава Ni-Cr под воздействием электромагнитных сил.

2. Эксперименты, проведенные с использованием скоростной видеосъемки, показали наличие мгновенной асимметричной формы капли и непрерывные колебания ее свободной поверхности, час-

тоту которых определяли с помощью обработки изображений.

3. Установлено, что в исследованном температурном диапазоне (1650 и 1750 °С) температура металла не оказывает существенного влияния на эту частоту.

4. Разработана двумерная переходная модель, описывающая распределение сил левитации внутри капли, перемешивание жидкого металла в капле под воздействием указанных сил и деформацию свободной поверхности, полностью учитывающая связь между потоком жидкого металла и динамическими характеристиками свободной поверхности.

5. Определено экспериментально, что при регулировании неизвестного значения тока в индукционной катушке модель может достаточно хорошо прогнозировать равновесную форму и положение взвешенной капли Ni-Cr, зафиксированные в нашей экспериментальной установке.

6. В ближайшем будущем будут проведены специальные работы по измерению тока в индукционной катушке с использованием установки, имеющейся в Киеве, для окончательной проверки данной модели.

7. На следующем этапе будут расширены области применения модели с включением явлений теплопереноса и переноса растворенных веществ в жидкой капле с тем, чтобы ее можно было использовать для имитации эксперимента со взвешенной каплей при исследовании взаимодействия газа с жидким металлом.

8. Разработанная модель будет использована в дополнении к экспериментальным данным для установления предельного массопереноса между газом и жидким металлом, а также кинетики переноса.

1. Bakhtiyarov S. I., Overfelt R. A. Recent res. dev. mater. Sci. 4:81. — 2003.
2. Petitnicolas L., Jardy A., Ablitzer D. Rev. metall — CIT / Sci. genie. mater 95:177. — 1998.
3. Szekely J., Schwartz E. // Proc. of the Intern. Symp. on electromagnetic processing of materials. — Nagoya, Japan, 1994. — 9 p.
4. Berry S. R., Hyers R. W., Racz L. M., Abedian B. // Intern. J. Thermophys 26:1565. — 2005.
5. Bojarevics V., Pericleous K. // ISIJ Intern. 43:890. — 2003.
6. Berry S., Hyers R. M., Abedian B., Racz L. M. // Metall mater trans B 31B:171. — 2000.
7. FLUENT Documentation (User's Guide, UDF Manual) Version 6.2.16, Fluent, Inc. — Lebanon, New Hampshire, 2005.
8. Hirt C. W., Nichols B. D. J. Comput Phys 39:201. — 1981.
9. Youngs D. L. Numerical methods for fluid dynamics. — Academic Press, New York, 1982. — 273 p.
10. Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. // J. Comput Phys 100:335. — 1992.
11. Delannoy Y., Pelletier D., Etay J., Fautrelle Y. // Proc. of PAMIR Conf., Ramatuelle, France, 2002.
12. Bojarevics V., Pericleous K. Magneto hydrodyn 37:93. — 2001.

Горн. шк. Политехн. ін-та області Лоран,
Нафси (Франція)

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 11.02.2008