

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСА ТОКА НА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ПРОВОДНИК

А.В. Иванов, А.В. Синчук, А.С. Богославская

*Институт импульсных процессов и технологий НАНУ,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, [iipt@iipt.com.ua](mailto:iipt@iipt.com.ua)*

#### Введение

В настоящее время для повышения качества литья исследователями предлагаются к применению способы, работа которых основана на электродинамическом силовом воздействии на жидкие и кристаллизующиеся сплавы. Одним из таких способов является обработка расплава импульсными токами. В отличие от постоянного или переменного тока импульсные режимы позволяют реализовать токи в десятки и сотни килоампер. За счет этого, во-первых, можно сократить длительность обработки расплава с 15–30 минут (постоянный ток) до нескольких минут, а во-вторых, эффективно использовать силовое влияние электромагнитного поля на металл при незначительном уровне потерь на джоулев нагрев. Минимизация затрат на нагревание проводника становится возможной благодаря кратковременному действию тока, локализованного в тонком скин-слое, и наличию временных пауз между импульсами.

Как показали результаты экспериментов, представленные в работах [1–5], импульсное электротокое воздействие на жидкий и кристаллизующийся металл приводит к измельчению зеренной структуры и повышению его однородности. Кратковременная периодическая интенсификация тепломассообменных процессов в пристеночной области позволяет также минимизировать перепад температур в обрабатываемом объеме, что создает условия для объемной кристаллизации. Однако многофакторность импульсного воздействия (амплитуда импульса, скважность, частота колебаний тока в импульсе, его форма, спектр и т.д.) создает трудности при выборе оптимальных электрических параметров и схем обработки в отличие от постоянного тока, где за основной технологический параметр принимается его плотность [6]. Неоднозначно обстоит вопрос и с импульсными источниками питания. В частности, в работах [1–4] использованы разрядные импульсы, полученные с помощью генераторов импульсных токов на основе емкостных накопителей энергии, с максимальной амплитудой тока  $I_{max}$  от 0,3 до 40 кА, частотой колебаний тока в импульсе от 0,1 до 1 кГц и частотой посылок в расплав до 1 кГц. При этом использовался один или несколько погружных электродов для введения импульсов в расплав. В работе [5] применен генератор переменного тока и широкополосные импульсы от 1 до 8000 кГц, токоподвод осуществлялся к электропроводящей изложнице с расплавом. Кроме того, в публикациях, посвященных обработке расплавов импульсным током, представлены, как правило, результаты металлургических экспериментальных исследований и крайне редко (например, в [4]) обсуждаются механизмы влияния на металл.

Очевидно, что при протекании импульса тока по жидкому металлическому проводнику в нем возникает ряд сопряженных электромагнитных и гидродинамических процессов, роль которых в изменении структуры и свойств обрабатываемого металла может быть ключевой. Их изучение актуально не только с научной точки зрения, но и с сугубо практической, позволяющей оптимизировать обработку импульсными токами по технологическим параметрам и вывести этот способ за рамки лабораторных исследований.

Цель данной работы – путем математического моделирования электромагнитных и гидродинамических процессов, возникающих при прохождении одиночного импульса тока через массивный жидкометаллический проводник, оценить вклад электродинамических сил в изменение его состояния. Такая оценка выполнялась применительно к обработке алюминиевого расплава периодически повторяющимися разрядными импульсами тока микросекундной длительности, источником которых является высоковольтный генератор импульсных токов с емкостным накопителем (рис. 1,а). Этим способом реализуется импульс с частотой колебаний тока порядка  $10^5$  Гц (рис. 2). Проведенные

предварительно экспериментальные исследования [7, 8] показали, что обработка расплава такими импульсами в течение 1 минуты обеспечивает в литом металле измельчение дендритной структуры, модифицирование эвтектики, компактирование интерметаллидных фаз и улучшение механических свойств.

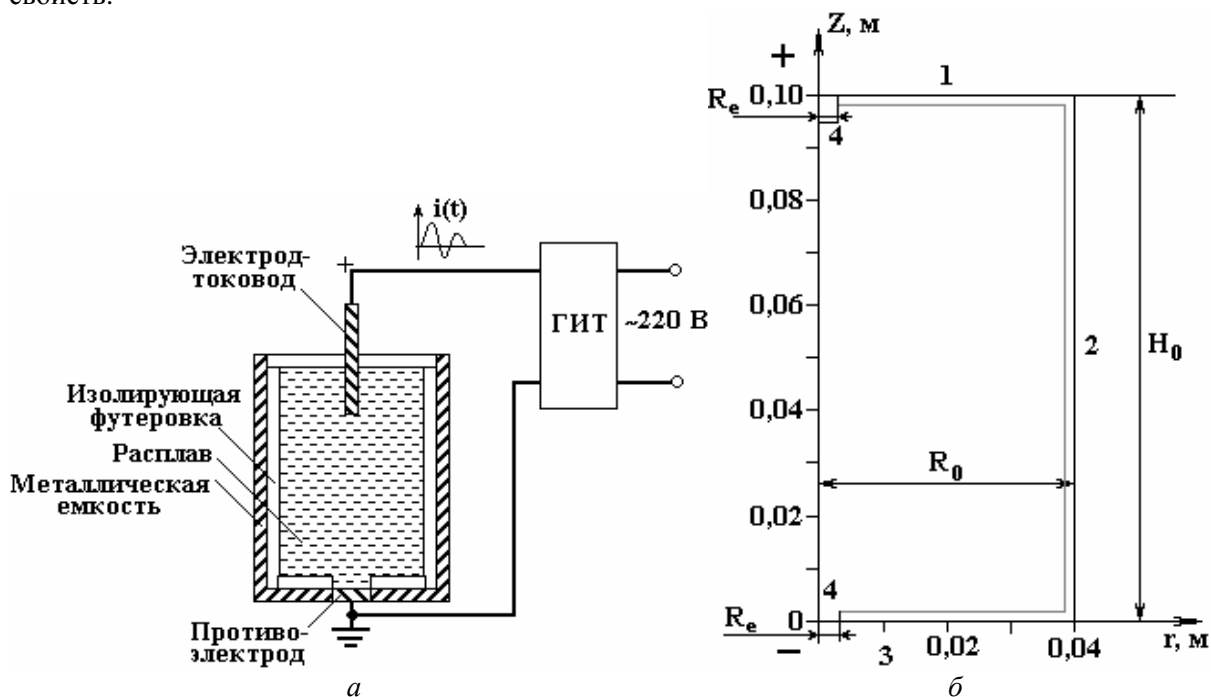


Рис. 1. Обработка расплава электрическим током: а – схема обработки; б – геометрическая модель проводника. 1 – зеркало расплава; 2 – боковая поверхность; 3 – донная поверхность; 4 – электроды

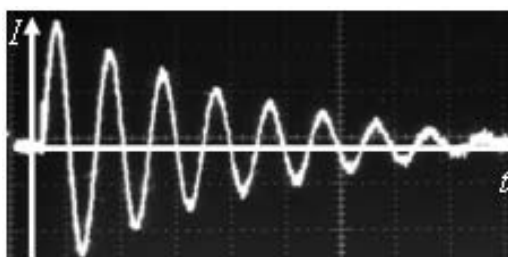


Рис. 2. Осциллограмма разрядного тока:  $mI=10$  В/дел,  $mt=10$  мкс/дел

### Постановка задачи

Процесс прохождения одиночного высокочастотного импульса тока по металлическому проводнику можно условно разбить на несколько последовательных стадий.

1. Вытеснение тока и магнитного поля к поверхности проводника и их концентрация в скин-слое толщиной  $\delta$ , которая определяется из выражения

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \sigma \cdot \omega}}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость,  $\mu = 1$ ;  $\sigma$  – удельная проводимость металла ( $\text{Ом} \cdot \text{м}^{-1}$ );  $\omega$  – круговая частота импульса тока,  $\text{рад}/\text{с}^{-1}$ .

2. Действие на расплав объемных электромагнитных сил  $F_{\text{эм}}$ , возникающих при взаимодействии проходящего через расплав импульса тока и индуцированного им магнитного поля, направленных от периферии к центру проводника с током.

3. Сжатие проводника магнитным давлением  $P_m$  и возбуждение в нем вихревых течений.

При моделировании используется безиндукционное приближение, то есть электромагнитное поле и гидродинамические процессы рассматриваются независимо друг от друга. В данном случае

задача решалась в двумерной осесимметричной постановке для электродной системы «острие-острие» (рис. 1,б).

При решении электромагнитной задачи используем систему уравнений Максвелла, записанную для случая квазистационарного поля:

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + \vec{J}^e \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (6)$$

где  $\nabla$  – оператор Гамильтона;  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля в расплаве, А/м;  $\vec{J}$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\vec{v}$  – скорость объекта, м/с;  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля в расплаве, Тл;  $\vec{J}^e$  – плотность наведенных (сторонних) токов, А/м<sup>2</sup>;  $\vec{D}$  – электрическая индукция, Кл/м<sup>2</sup>.

После несложных преобразований и введения цилиндрической системы координат ( $Z, r, \varphi$ ) получим уравнение для напряженности магнитного поля  $\vec{H}_\varphi$ , которая зависит от угла  $\varphi$ :

$$\mu_0 \mu \frac{\partial \vec{H}_\varphi}{\partial t} + \nabla \times (\sigma^{-1} (\nabla \times \vec{H}_\varphi - \vec{J}^e) - \vec{v} \times (\mu_0 \mu \vec{H}_\varphi)) = 0 \quad (7)$$

Геометрические размеры элементов модели выбираем идентичными тем, которые были использованы при проведении экспериментов в [8]: высота жидкометаллического проводника  $H_0 = 100$  мм, его радиус  $R_0 = 40$  мм, глубина погружения электрода в расплав – 5 мм, радиус погруженного электрода  $R_e$  и противоэлектрода – 2 мм. Материал электродов – медь, жидкий проводник – алюминиевый расплав при температуре 700 °С.

Примем, что плотность сторонних токов  $\vec{J}^e = 0$  и на оси  $Z$   $H_\varphi = 0$ . Зададим начальные условия:  $H_\varphi|_{t=0} = 0$ ;  $I|_{t=0} = 0$ ;  $v|_{t=0} = 0$ .

Граничные условия для областей, выделенных на рис. 1,б:

для области 1: 
$$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot r}.$$

для области 2: 
$$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot R_0}.$$

для области 3: 
$$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot r}.$$

для области 4: 
$$H_\varphi = \frac{I(t) \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot R_e^2}.$$

Форму импульса тока  $I(t)$  зададим в виде затухающей синусоиды, которая адекватно аппроксимирует реальную кривую тока:

$$I(t) = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \cdot e^{(-R/2L)t} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (8)$$

где  $U_0$  – напряжение заряда конденсаторной батареи, В;  $C$  – емкость конденсаторной батареи, мкФ;  $L$  – индуктивность разрядного контура, мкГн;  $R$  – активное сопротивление разрядного контура, Ом.

Параметры разрядного контура выберем таким образом, чтобы можно было оценить влияние силы и частоты колебаний тока в импульсе на характеристики электромагнитного поля в обрабатываемом проводнике (см. таблицу). Длительность импульса  $\tau$  в расчетах ограничим 8 периодами, которые фиксируются на осциллограммах разрядного тока при выбранных параметрах разрядного контура и заданном сопротивлении проводника.

#### Варьируемые параметры

Режим	$U_0$ , кВ	$C$ , мкФ	$L$ , мкГн	$I_{max}$ , кА	$\omega$ , $10^{-6} \text{ с}^{-1}$	$\tau$ , мкс
1	12	0,25	0,5	8,5	2,8	17,6
2	12	4	8	8,5	0,18	284,0
3	31	0,25	0,5	22	2,8	17,6
4	31	1	2	22	0,71	70,4
5	31	4	8	22	0,18	284,0

Величину магнитного давления  $P_m$  определяем из выражения

$$P_m(t, r) = \frac{\mu\mu_0 H_\varphi^2(t, r)}{2} \quad (9)$$

Примем, что движение жидкого металла возникает только под воздействием объемной электромагнитной силы, которая определяется из выражения

$$\vec{F}_{эм} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (10)$$

Гидродинамические процессы в проводнике рассмотрим путем численного решения уравнения Навье – Стокса для несжимаемой жидкости при  $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \gamma \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P_m + \frac{\vec{F}_{эм}}{\rho} \quad (11)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\gamma$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho$  – плотность расплава,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

#### Результаты моделирования

Численное решение уравнений производилось с помощью пакета мультифизического моделирования Comsol 3.3. На рис. 3 представлены результаты расчета напряженности магнитного поля в различных поперечных сечениях проводника на глубине  $h$  от зеркала расплава в момент времени, когда разрядный ток достигает первого максимума  $I_{max}$ . Наблюдаются непотенциальный характер поля в образце и закономерное увеличение напряженности поля с увеличением  $I_{max}$ . При этом поле сконцентрировано в поверхностном скин-слое толщиной 0,3 мм (режимы 1 и 3), 0,7 (режим 4), 1,4 мм (режимы 2 и 5).

Расчеты также показывают (рис. 4), что максимальное магнитное давление, вызванное действием направленной от поверхности к центру проводника электромагнитной силы  $F_{эм}$ , в пристеночной области расплава при прохождении выбранного килоамперного импульса тока составляет от 0,65 до 4,4 кПа. Испытывая это давление, проводник сжимается. Но поскольку речь идет о металлической жидкости, которая в свою очередь оказывает давление на стенки формы, то результирующее давление вдоль боковой стенки проводника будет определяться разностью

$$P = P_m - P_{cm},$$

где  $P_{cm}$  – металлостатическое давление в расплаве, Па.

Если принять, что на глубине  $H_0 = 100$  мм жидкого алюминиевого проводника  $P_{cm}$  составляет 2,3 кПа, то неравенство  $P_m > P_{cm}$ , которое определяет начало реального сжатия, будет выполняться при условии  $I_{max} > 15$  кА. В этом случае магнитное давление уже будет оказывать формирующее воздействие на процесс кристаллизации, что подтверждается экспериментальными данными работы [8],

где путем импульсной электротокковой обработки по режиму 3 существенно улучшены параметры структуры и механические свойства металла.

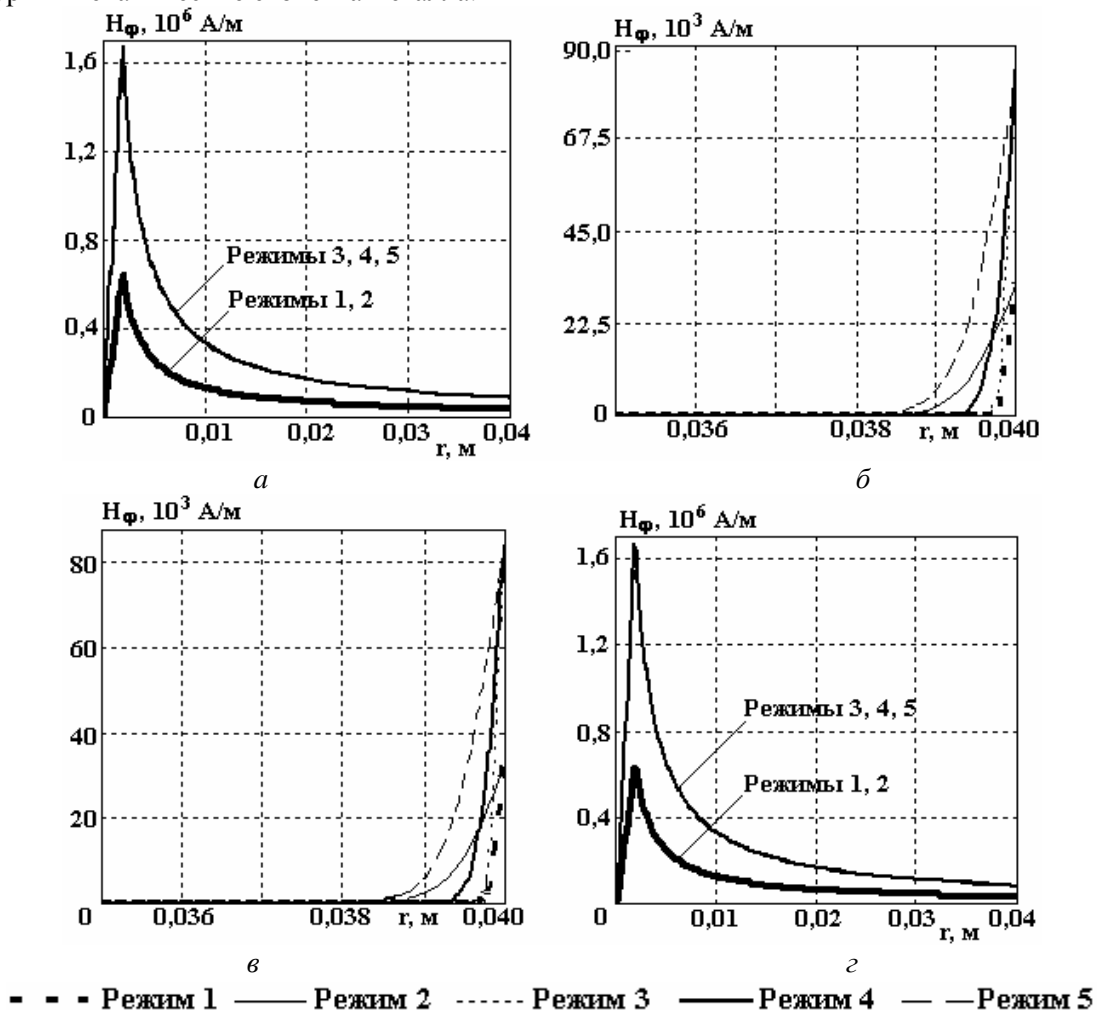
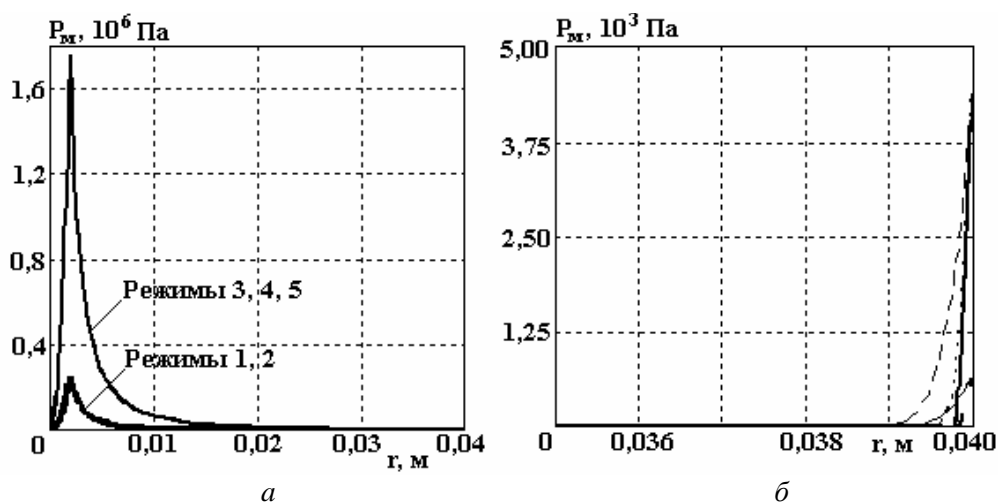


Рис. 3. Распределение магнитного поля по радиусу проводника на глубине от зеркала расплава  $h$  в момент достижения током первого максимума: а –  $h = H_0$ ; б –  $h = 98 \cdot 10^{-3}$  м; в –  $h = 50 \cdot 10^{-3}$  м; г –  $h = 0$

Анализируя рис. 3 и 4, можно также выделить существенную концентрацию электромагнитного поля и давления в характерных областях проводника – стыках стенок и приэлектродных зонах, где имеют место скачки магнитного давления до  $10^5$ – $10^6$  Па. Подчиняясь правилу сложения векторных сил, результирующие усилия в таких областях могут быть существенными так, чтобы формировать неоднородное поле скоростей и вызывать различного рода вихревые потоки в расплаве.



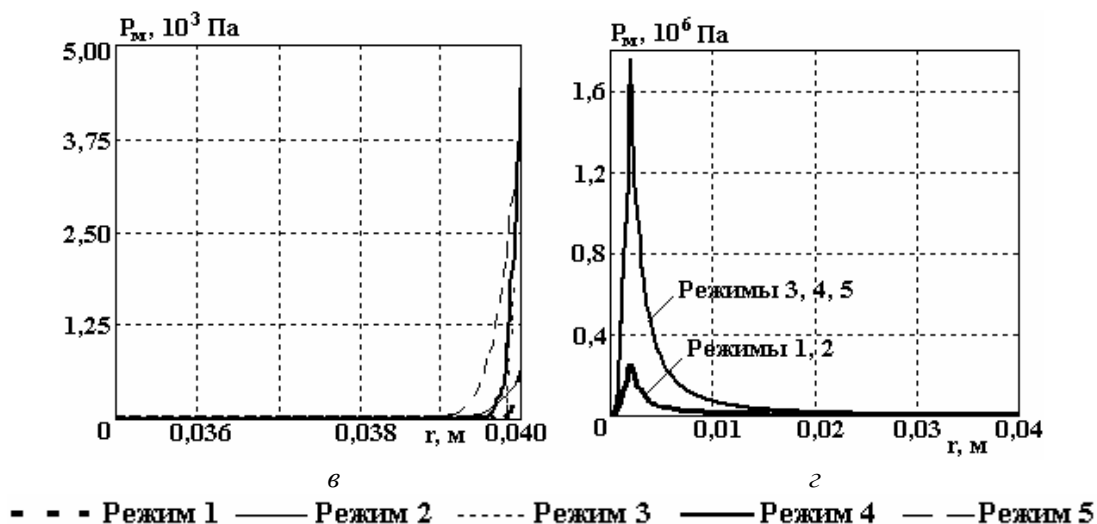


Рис. 4. Распределение магнитного давления по радиусу проводника на глубине от зеркала расплава  $h$  в момент достижения током первого максимума: а –  $h = H_0$ ; б –  $h = 98 \cdot 10^{-3}$  м; в –  $h = 50 \cdot 10^{-3}$  м;  $z - h = 0$

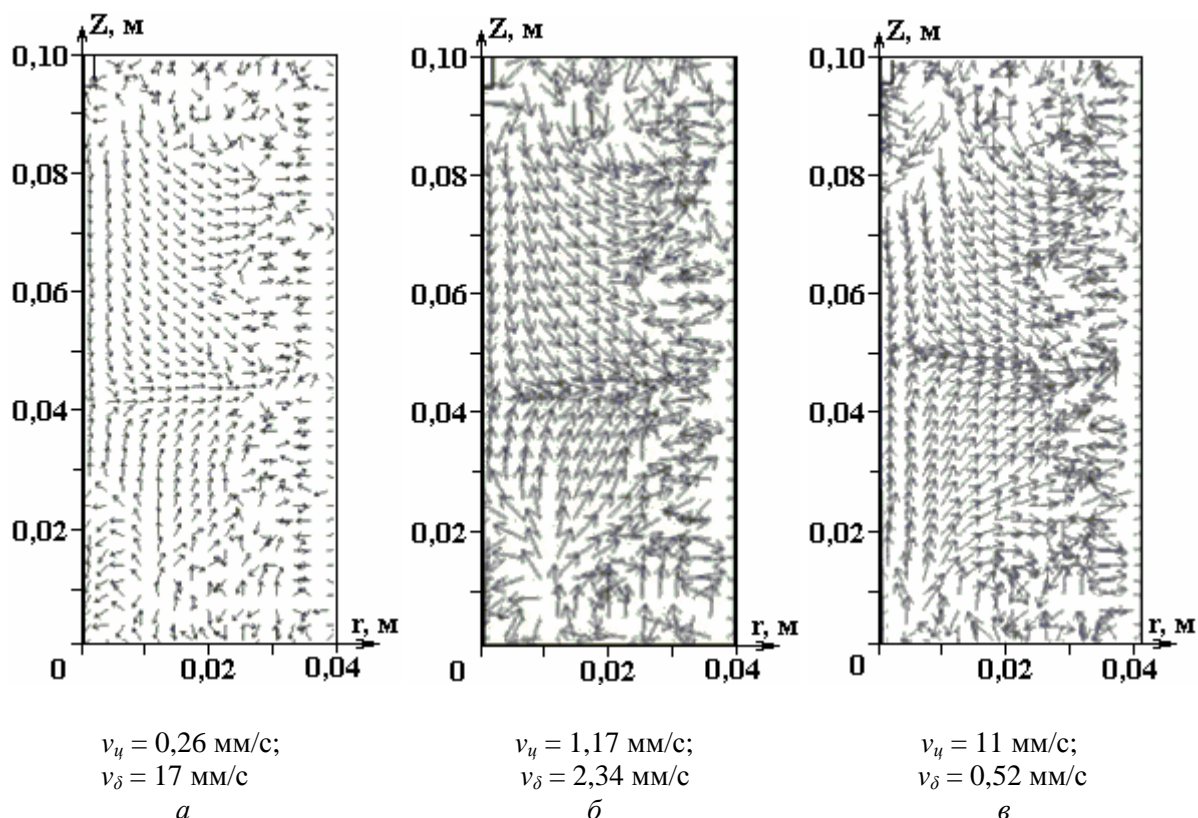


Рис. 5. Поле скоростей в жидкометаллическом алюминиевом проводнике: а – режим 3; б – режим 4; в – режим 5

Поля скоростей в расплаве алюминия для режимов 3–5, где  $I_{max} = \text{const}$ , приведены на рис. 5. Во всех случаях для электродной системы «острие-острие» наблюдается двухконтурное поле скоростей течений. Можно видеть, как в центральной части проводника формируются две четко выраженные области с противоположно направленными потоками, ограниченные периферийной зоной с хаотическим распределением скоростей. Эти потоки устремлены к центральному сечению проводника, в котором они сходятся, и далее жидкость движется в радиальном направлении. Расчетным путем определены также максимальные значения скорости движения в центральном сечении проводника  $v_u$  и максимальные значения скорости движения жидкости в скин-слое  $v_\delta$ . При уменьшении частоты тока и соответственно увеличении длины импульса в 16 раз  $v_u$  увеличиваются в 42, а  $v_\delta$  – в 33 раза. По перифе-

рийному скин-слою перемешивание происходит более интенсивно. Учитывая разнонаправленность движения слоев жидкости и абсолютные значения скоростей, можно также говорить о том, что полное перемешивание проводника заданных размеров происходит за промежуток времени от нескольких секунд (режим 5) до нескольких десятков секунд (режим 3). Для сравнения: в работе [8], где получены положительные изменения структуры и свойств алюминиевого сплава, длительность обработки импульсным током составляла 60 с.

Для выяснения влияния геометрии жидкометаллического проводника на формирование поля скоростей течений были рассчитаны максимальные скорости течений в его центральном сечении при разном отношении радиуса к высоте  $R_0/H_0$  (рис. 6). Видно, что скорость  $v_{\text{ц}}$  немонотонно изменяется в зависимости от длительности импульса и отношения  $R_0/H_0$ . Более интенсивные процессы перемешивания следует ожидать при длинных импульсах и при уменьшении  $R_0/H_0$ , то есть в длинных и узких проводниках. С ростом  $R_0/H_0$  происходит стабилизация значения скорости приблизительно на одном уровне.

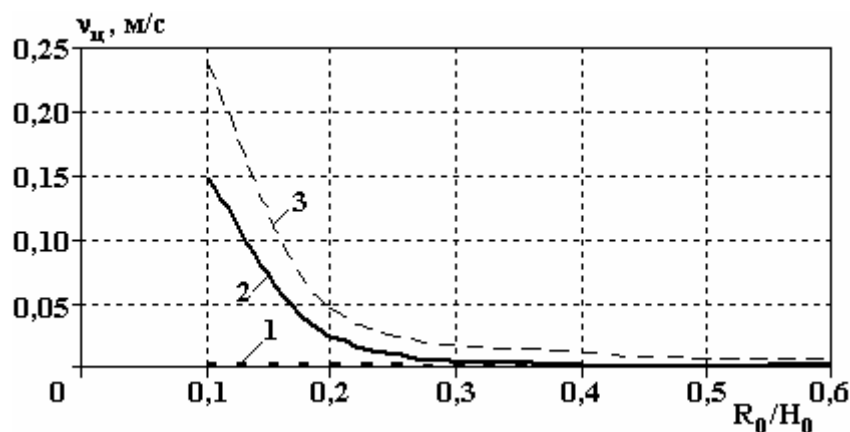


Рис. 6. Максимальные скорости течений в центральной части жидкометаллического алюминиевого проводника. 1 – режим 3; 2 – режим 4; 3 – режим 5

Следует обратить внимание и на прикладную значимость проведенных расчетов, для которых использован довольно узкий по сравнению с практически возможным диапазон варьируемых технологических параметров  $U_0$ ,  $C$ ,  $L$ , задающих импульс тока. На самом деле существующее на сегодняшний день высоковольтное импульсное оборудование с емкостными накопителями энергии позволяет изменять эти параметры в гораздо более широких пределах [9]. А это открывает возможности для обработки самых разнообразных по объему и форме проводников.

### Выводы

Пропускание импульсного тока через жидкометаллический проводник приводит к развитию существенно нелинейных электромагнитных и гидродинамических процессов, чувствительных к изменению характеристик импульса тока, что обеспечивает более широкие функциональные возможности импульсной токовой обработки по сравнению с обработкой постоянным током.

Вклад электродинамических сил, действием которых в жидкометаллическом проводнике реализуются процессы сжатия и перемешивания, в изменение его состояния становится ощутимым при пропускании импульса тока с определенными параметрами:

- сжатие проводника возникает при превышении некоторого порогового значения силы тока в импульсе, за счет чего могут изменяться термодинамические условия кристаллообразования внутри жидкого объема и особенно в пристеночных областях расплава;
- на процесс перемешивания жидкости существенное влияние оказывают частота тока в импульсе, длительность импульса и геометрические параметры проводника, что необходимо учитывать путем подбора соответствующих режимов импульсной токовой обработки реальных литейных емкостей с расплавом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Fucheng Zhang, Ming Zhang, Bo Li, Jianhui Li. Effect of high energy-density pulse current on solidification. *Materials Science*. 2007, **13**(2), 120–123.
2. Xiliang Liao, Qijie Zhai, Jun Luo, Wenjie Chen, Yongyong Gong. Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum. *Acta Materialia*. 2007, (55), 3103–3109.

3. Chunyan Ban, Yi Han, Qixian Ba, Jianzhong Cui. Influence of pulse electric current on solidification structure of Al—Si alloy. *Electromagnetic Processing of Material*. 2007, (1), 34—37.
4. Rongshan Qin. Solidification under electropulsing. *International Journal of Cast Metal Research*. 2007, 25(7), 92—98.
5. Зарембо В.И., Киселева О.Л., Колесников А.А., Подгорская Е.С., Суворов К.А. Влияние импульсов тока на процессы плавления и кристаллизации металлов. *Металлургия машиностроения*. 2003, (1), 11—15.
6. Петров С.С., Пригунова А.Г., Пригунов С.В. Трансформация структуры силуминов при воздействии на расплав постоянного электрического тока. *Теория и практика металлургии*. 2006, (4—5), 89—91.
7. Вернидуб А.Г., Волков Г.В., Грабовый В.М., Семенченко А.И., Федченко Н.А., Цуркин В.Н., Шейгам В.Ю., Шеневидько Л.К. Обработка сплава АК7 импульсным электрическим током. *Процессы литья*. 2005, (1), 64—67.
8. Иванов А.В., Цуркин В.Н., Синчук А.В., Крептюк Я.В. Влияние параметров электроимпульсной обработки на структуру и свойства алюминиевых сплавов. *Материалы Международной научно-технической конференции "Материалы и механизмы морского транспорта. Методы исследования и упрочнения. Технология производства"*: Сб. докл. Севастополь, УМИ, 2008. 72—78.
9. Щерба А.А., Дубовенко К.В. *Высоковольтные электроразрядные компактные системы*. К.: Наук. думка, 2008. 269 с.

Поступила 09.08.10

### Summary

The results of mathematical simulation of electromagnetic and hydrodynamic processes, arising up in a liquid-metal aluminum conductor during passing of kiloampere single pulse current of the microsecond duration are presented. It is established that the compression of liquid conductor by magnetic pressure begins at exceeding of some threshold value of current strength in an pulse, determined by metal static pressure. The fields and absolute values of flow speeds are determined in an conductor depending on the parameters of pulse current.

---