

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

А.В. Иванов, А.В. Синчук, А.С. Рубан

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@iipt.com.ua*

Показано, что наряду с силой тока в импульсе напряжение на емкостном накопителе, емкость накопителя, индуктивность разрядного контура и тип электродной системы являются важными технологическими параметрами, определяющими характер электровихревых течений, величину магнитного давления и скорости перемешивания жидкого металлического проводника при пропускании через него импульсного тока. Наиболее эффективной среди исследованных электродных систем для обработки цилиндрического проводника считается система «острие – острие», обеспечивающая интенсивное перемешивание расплава, благоприятную структуру и улучшенный комплекс механических свойств сплавов после кристаллизации.

УДК 537.528: 669.017.16

ВВЕДЕНИЕ

В металлургической промышленности и литейном производстве достаточно широко распространены различные технологии с применением больших электрических токов, протекающих через ванну расплава. Типичным примером является пропускание через расплав, находящийся в разливочном ковше или изложнице, импульсного тока, который, в отличие от постоянного или переменного тока, достигает десятков и сотен килоампер. Использование таких токов, а также наличие нескольких токоподводов к расплаву приводит к формированию в нем непотенциальных электромагнитных полей и протеканию ряда физико-химических процессов, которые могут оказывать значительное влияние на состояние расплава. Например, при неоднородном растекании тока в замкнутом объеме проводящей жидкости электромагнитная сила, возникающая как результат взаимодействия тока с собственным магнитным полем, приобретает вихревой характер и, уравниваясь силами гидродинамического происхождения, инициирует в расплаве электровихревые течения (ЭВТ). Именно с ЭВТ, а не с электродиффузией химических элементов, скорость которой крайне мала, связывают перемешивание расплава в ванне, а значит, и получение качественного однородного продукта.

Активное изучение ЭВТ и электромагнитных сил, воздействующих на ванну расплава при электродуговом и электрошлаковом переплаве, началось в 50–60-х годах прошлого века [1, 2]. Теоретические и экспериментальные исследования этого явления при прохождении постоянного тока через проводник рассмотрены в работе [3]. В частности, установлено, что в отсутствие внешнего магнитного поля основное влияние на характер ЭВТ оказывают сила тока и геометрические условия его растекания в объеме жидкости (геометрия жидкого проводника, расстояние между электродами, плотность и вязкость расплава). В настоящее время ЭВТ изучаются преимущественно в процессах, происходящих в плавильных агрегатах [4], и крайне редко (например, в [5]) – применительно к внепечной обработке расплава. Анализ современных публикаций, где представлены результаты обработки расплавов импульсным током, не позволяет однозначно определить роль ЭВТ. Между тем при протекании через проводник кратковременного мощного импульса тока, когда, в отличие от постоянного тока, Джоулев нагрев и электродиффузия сведены к минимуму, объемные электромагнитные силы и вихревые течения могут быть ключевыми механизмами в изменении состояния жидкого проводника.

Ранее в работе [6] нами показано, как ЭВТ возникают во время обработки цилиндрических емкостей с расплавом разрядными импульсами тока с амплитудой I_{max} от 4 до 6,5 кА. Происходит это из-за концентрации электромагнитного поля в характерных областях проводника – стыках стенок и приэлектродных зонах (использована электродная система «острие-острие»), где имеют место скачки магнитного давления порядка 1 атм. На примере этой же электродной системы показано, что ЭВТ определяется не только силой импульсного тока, но и такими параметрами, как частота тока в импульсе, длительность импульса и геометрия проводника [7]. Однако возможности управлять характером ЭВТ этим не ограничиваются, так как метод обработки расплавов импульсным током (в част-

ности, периодически повторяющимися разрядными импульсами микросекундной длительности, источником которых является высоковольтный генератор импульсных токов с емкостным накопителем) позволяет варьировать множество других параметров (энергия в импульсе, частота следования импульсов, скважность, его форма, спектр и т.д.).

Цель данной работы – путем математического моделирования определить влияние электрических параметров разрядной цепи и типа электродной системы на ЭВТ в жидком алюминиевом проводнике цилиндрической формы и получить экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность перемешивания расплава при обработке периодически повторяющимися импульсами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как и в работе [7], рассматривается процесс прохождения одиночного импульса с частотой колебаний тока порядка 10^5 Гц по жидкому алюминиевому проводнику при температуре 700°C . Проводник имеет форму цилиндра высотой $H_0 = 100$ мм и радиусом $R_0 = 40$ мм. Форма импульса тока $I(t)$ задается в виде затухающей синусоиды:

$$I(t) = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \cdot e^{(-R/2L)t} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

где U_0 – напряжение заряда конденсаторной батареи, В; C – емкость конденсаторной батареи, мкФ; L – индуктивность разрядного контура, мкГн; R – активное сопротивление разрядного контура, Ом; ω – круговая частота импульса тока, рад·с⁻¹.

Напряженность магнитного поля H_φ находим из уравнения Максвелла, записанного в цилиндрической системе координат (Z, r, φ) :

$$\mu_0 \mu \frac{\partial H_\varphi}{\partial t} + \nabla \times (\sigma^{-1} (\nabla \times H_\varphi - \mathbf{J}^e) - \mathbf{v} \times (\mu_0 \mu H_\varphi)) = 0, \quad (2)$$

где ∇ – оператор Гамильтона; \mathbf{v} – скорость объекта, м/с; \mathbf{J}^e – плотность наведенных токов, А/м²; μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость, $\mu = 1$; σ – удельная проводимость металла (Ом·м)⁻¹.

Величину магнитного давления P_m определяем из выражения

$$P_m(t, r) = \frac{\mu_0 \mu H_\varphi^2(t, r)}{2}. \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \gamma \Delta \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P_m + \frac{\mathbf{F}_{эм}}{\rho}, \quad (4)$$

где $\mathbf{F}_{эм}$ – электромагнитная сила, Н; Δ – оператор Лапласа; γ – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; ρ – плотность расплава, кг/м³.

Примем, что плотность сторонних токов $\mathbf{J}^e = 0$ и на оси $Z H_\varphi = 0$. Зададим начальные условия:

$$H_\varphi|_{t=0} = 0; \quad I|_{t=0} = 0; \quad \mathbf{v}|_{t=0} = 0.$$

Рассмотрим три наиболее технологичные электродные системы, с помощью которых производится токоподвод к жидкому проводнику.

Электродная система «острие–острие» (рис. 1,а) – система для обработки расплава в емкости, выполненной из непроводящего материала. Состоит из верхнего погружаемого электрода и нижнего неподвижного противоэлектрода с равными радиусами $R_e = 2$ мм. Материал электродов – медь.

Электродная система «острие–плоскость» (рис. 1,б) – система для обработки расплава в емкости с футерованными непроводящими боковыми стенками. Роль противоиэлектрода выполняет открытое металлическое дно емкости ($R_e = R_0 = 40$ мм).

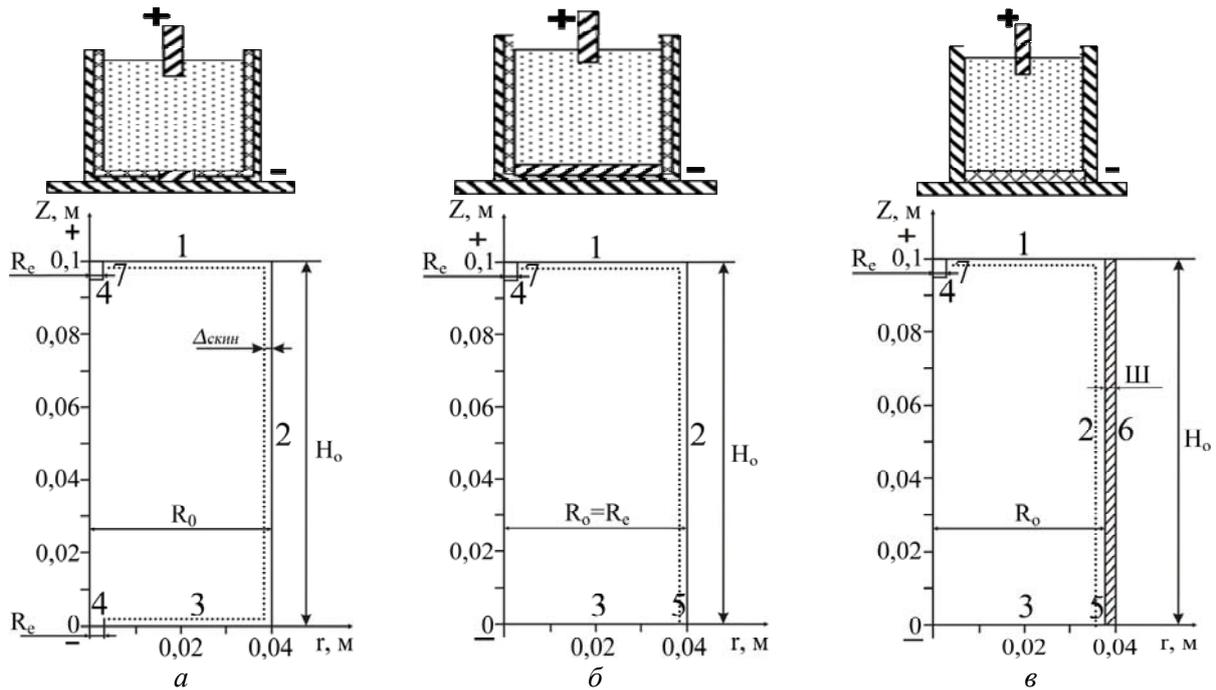


Рис. 1. Геометрическая модель жидкометаллического проводника: а – «острие–острие»; б – «острие–плоскость»; в – «острие–стенки». 1 – зеркало расплава; 2 – внешняя боковая поверхность проводника; 3 – нижняя торцевая стенка проводника; 4 – электрод и противоелектрод; 5 – область стекания тока; б – внешняя боковая стенка проводящей емкости; 7 – боковая поверхность электрода; Ш – проводящая стенка емкости толщиной 0,005 м

Электродная система «острие–стенки» (рис. 1,в) – система для обработки расплава в емкости с проводящими боковыми стенками и изолированным внутри дном.

Приняв, что погружаемый в расплав верхний электрод может быть изолированным и неизолированным по боковой поверхности, зададим граничные условия согласно табл. 1.

Таблица 1. Граничные условия

Область	«Острие–острие»	«Острие–плоскость»	«Острие–стенки»
1	$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot r}$	$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot r}$	$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot r}$
2	$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot R_0}$	$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot R_0}$	$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot R_0}$
3	$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot r}$	$H_\varphi = 0$	$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0^{**}$
4	$H_\varphi = \frac{I(t) \cdot r + \Delta_{\text{скин}}}{2 \cdot \pi \cdot R_e^2 \cdot \Delta_{\text{скин}}}$	$H_\varphi = \frac{I(t) \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot R_e^2}$	$H_\varphi = \frac{I(t) \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot R_e^2}$
5	–	$H_\varphi = \frac{I(t) \cdot (r - R_0 + \Delta_{\text{скин}})}{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot \Delta_{\text{скин}}}$	$H_\varphi = \frac{I(t) \cdot (r - (R_0 + \text{Ш}) + \Delta_{\text{скин}})}{2 \cdot \pi \cdot (R_0 + \text{Ш}) \cdot \Delta_{\text{скин}}}$
6	–	–	$H_\varphi = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot (R_0 + \text{Ш})}$
7*	$H_\varphi = 0$	$H_\varphi = 0$	$H_\varphi = 0$

*Изолированная боковая поверхность погружного электрода.

** \mathbf{E} – напряженность электрического поля; \mathbf{n} – нормаль.

Выбрав в качестве некоторой исходной точки значения $U_0 = 30$ кВ; $C = 1$ мкФ; $L = 2$ мкГн, при которых в работе [6] нами получены положительные изменения структуры и свойств алюминиевого сплава, проанализируем влияние на ЭВТ параметров разрядного контура, изменяющихся в пределах: $U_0 = 10\text{--}50$ кВ; $C = 0,25\text{--}5$ мкФ; $L = 1\text{--}8$ мкГн. Указанный диапазон без особых сложностей реализуется экспериментально существующими источниками и задает импульсы тока с I_{max} от 3,5 до 80 кА и $\omega \approx (160\text{--}1900) \cdot 10^3$ рад·с⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное решение уравнений производилось с помощью пакета мультифизического моделирования Comsol 3.3. На рис. 2 для различных электродных систем с неизолированным погружным электродом представлены векторные изображения ЭВТ, возникающие в жидком проводнике в тот момент, когда разрядный ток достигает первого максимума $I_{max} = 21$ кА (U_0 , C и L взяты для исходной точки). Отмечается схожий характер ЭВТ для электродных систем «острие–плоскость» и «острие–стенки», образующих одноконтурное поле в основном, центральном, объеме проводника и периферийные зоны с хаотическим распределением скоростей. Для электродной системы «острие–острие» наблюдается двухконтурное поле скоростей течений с двумя противоположно направленными потоками в центральной части проводника, ограниченными периферийной зоной с хаотическим распределением скоростей. Эти потоки устремлены к центральному сечению проводника, в котором они сходятся, и далее жидкость движется в радиальном направлении. Турбулентность особенно сильно выражена вблизи остриевых электродов, где напряженность электрического и магнитного полей максимальна, и в зонах, где действуют разнонаправленные силы $F_{эм}$, то есть в углах цилиндрического проводника. Исходя из максимальных значений скорости движения в центральном диаметрально сечении проводника $v_{ц}$ и максимальных значений скорости движения жидкости в скин-слое v_{Δ} (табл. 2), определенных расчетным путем, можно также полагать, что именно электродной системой «острие–острие» обеспечивается наиболее интенсивное перемешивание расплава. Следовательно, применяемая электродная система не только выполняет функцию токоподвода, но и является важным технологическим параметром, с помощью которого можно управлять характером ЭВТ в расплаве.

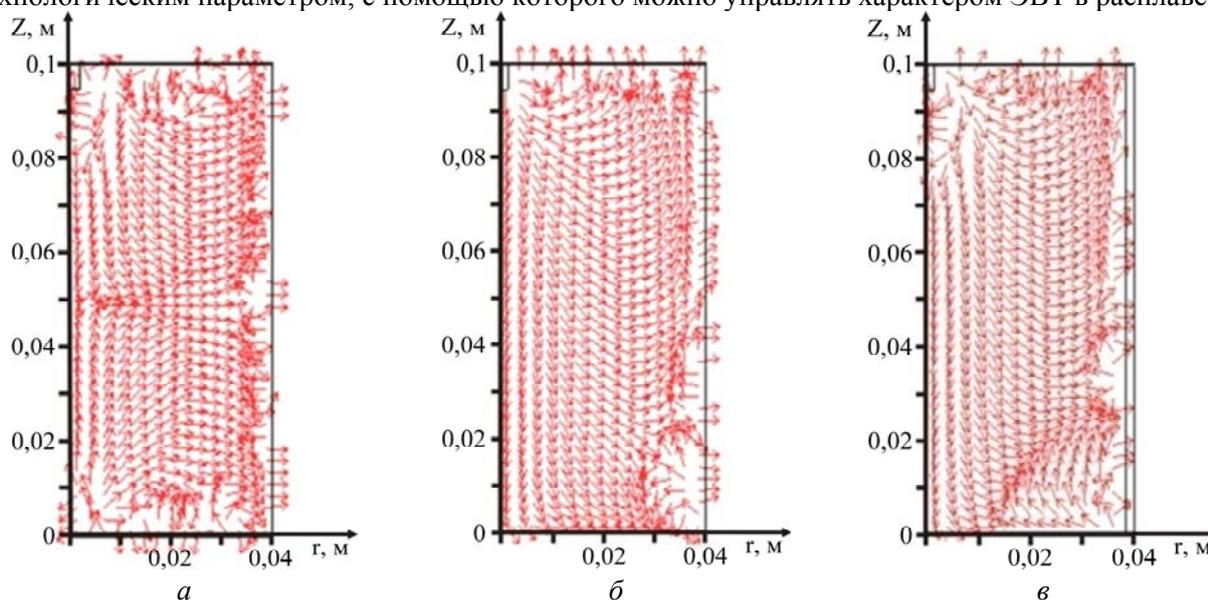


Рис. 2. Поля скоростей в жидкометаллическом проводнике в момент достижения током первого максимума (неизолированный погружной электрод; $U_0 = 30$ кВ; $C = 1$ мкФ; $L = 2$ мкГн): а – «острие–острие»; б – «острие–плоскость»; в – «острие–стенки»

Таблица 2. Максимальные скорости течений в центральном диаметрально сечении $v_{ц}$ и в скин-слое v_{Δ} ($U_0 = 30$ кВ; $C = 1$ мкФ; $L = 2$ мкГн)

Электродная система	Неизолированный погружной электрод			Изолированный погружной электрод		
	«острие–острие»	«острие–плоскость»	«острие–стенки»	«острие–острие»	«острие–плоскость»	«острие–стенки»
$v_{ц}$, м/с	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$2,14 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$
v_{Δ} , м/с	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$

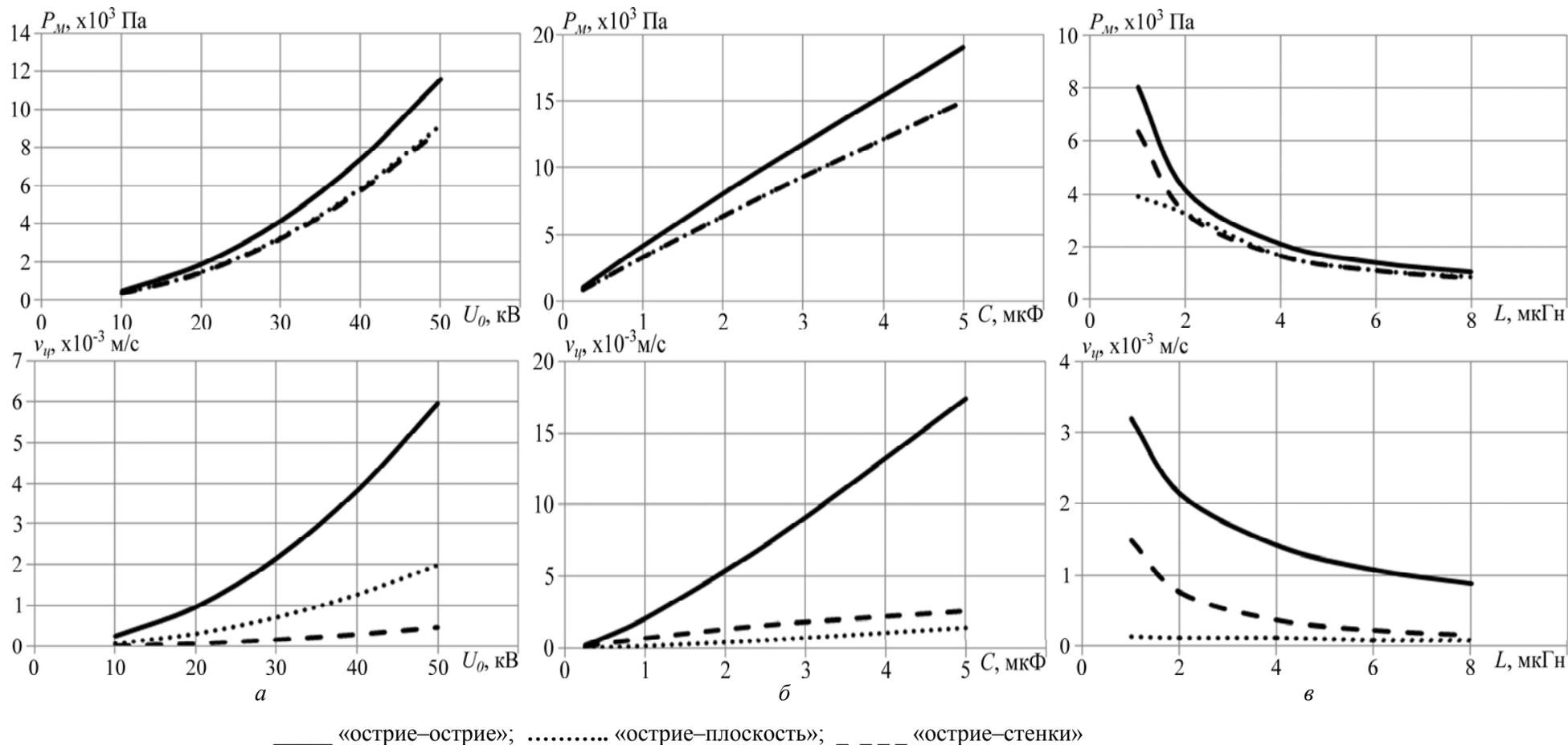


Рис. 3. Магнитное давление на боковой поверхности и максимальные скорости течений в центральном диаметральной сечении жидкометаллического проводника в момент достижения током первого максимума в зависимости от параметров разрядного контура: а – $C = 1$ мкФ и $L = 2$ мкГн; б – $U_0 = 30$ кВ и $L = 2$ мкГн; в – $U_0 = 30$ кВ и $C = 1$ мкФ

На рис. 3 приведены зависимости максимального магнитного давления на боковую поверхность цилиндрического проводника и максимальных скоростей движения в центральном диаметральном сечении проводника от параметров разрядного контура U_0 , L , C (в момент, соответствующий первому максимуму тока в импульсе). Как и сила тока в импульсе, магнитное давление и скорости ЭВТ находятся в прямо пропорциональной зависимости от напряжения на накопителе и емкости и в обратно пропорциональной зависимости от индуктивности разрядного тока. Можно видеть, что варьирование напряжением зарядки накопителя и емкостью накопителя позволяет существенно изменять магнитное давление и скорости ЭВТ в расплаве (для электродной системы «острие–острие» – в 10 раз и более). Варьирование индуктивностью L изменяет магнитное давление и скорости ЭВТ в гораздо более узком диапазоне, что допускает возможность увеличения индуктивности разрядного контура за счет удлинения токоподводящих проводов к расплаву без «ущерба» для процессов перемешивания. Напомним также, что в соответствии с полученными нами ранее в работе [7] данными ЭВТ существенно зависят от того, каким набором U_0 , L , C реализуется одна и та же сила тока в импульсе. Импульсы, сформированные за счет изменения емкости или индуктивности при неизменном напряжении, влекут за собой изменение частоты тока, следовательно, ширины скин-слоя $\Delta_{скин}$. Таким образом, несмотря на существующую взаимосвязь (см. соотношение (1)), U_0 , L , C и I_{max} являются технологическими параметрами, независимо определяющими характер ЭВТ.

Диаграмма, представленная на рис. 4, позволяет наблюдать влияние на скорость ЭВТ глубины погружения неизолированного верхнего электрода в расплав h , за счет которой также можно в несколько раз увеличить скорость перемешивания. При этом в различных электродных системах проявляется принципиально различный характер зависимостей $v_i(h)$. Возможно, это связано с изменением условий растекания тока, когда с увеличением глубины погружения электрода увеличивается доля тока, проходящего через его боковую неизолированную поверхность. Косвенно это предположение можно подтвердить, анализируя поля скоростей в проводнике с изолированным погружным электродом (рис. 5) и данные табл. 2. Как видно из рис. 5, изоляция погружного электрода не вносит принципиальных изменений в картины ЭВТ – в электродной системе «острие–острие» поле остается двухконтурным, в других системах – одноконтурным. Однако при отсутствии протекания тока через боковую поверхность электрода становятся более очерченными контуры течений, в пределах которых меняется направление движения жидкости на противоположное, и не столь выраженными, как в случае неизолированного электрода, периферийные хаотические течения. Расчеты показывают также, что в системах с изолированным электродом значения v_i несколько выше, а скорости периферийных течений v_{Δ} , наоборот, меньше по сравнению с системами с неизолированным электродом. Но в конечном итоге принятие решения о необходимости изоляции электрода должно быть сопряжено с поиском подходящих высокотемпературных изоляционных материалов.

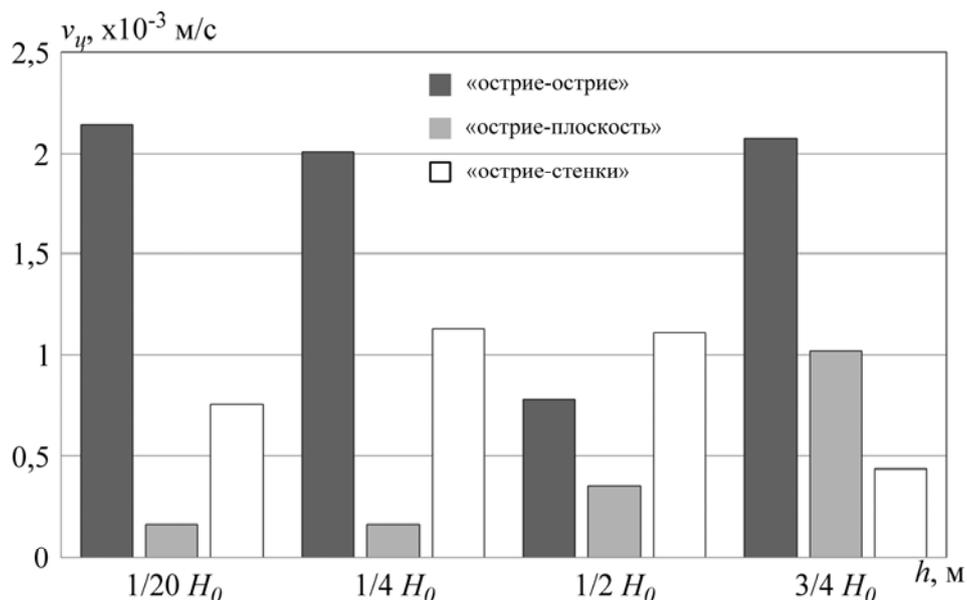


Рис. 4. Зависимость максимальной скорости течений в центральном диаметральном сечении в момент достижения током первого максимума от глубины погружения электрода (электродная система «острие–острие»; неизолированный погружной электрод; $U_0 = 30$ кВ; $C = 1$ мкФ; $L = 2$ мкГн)

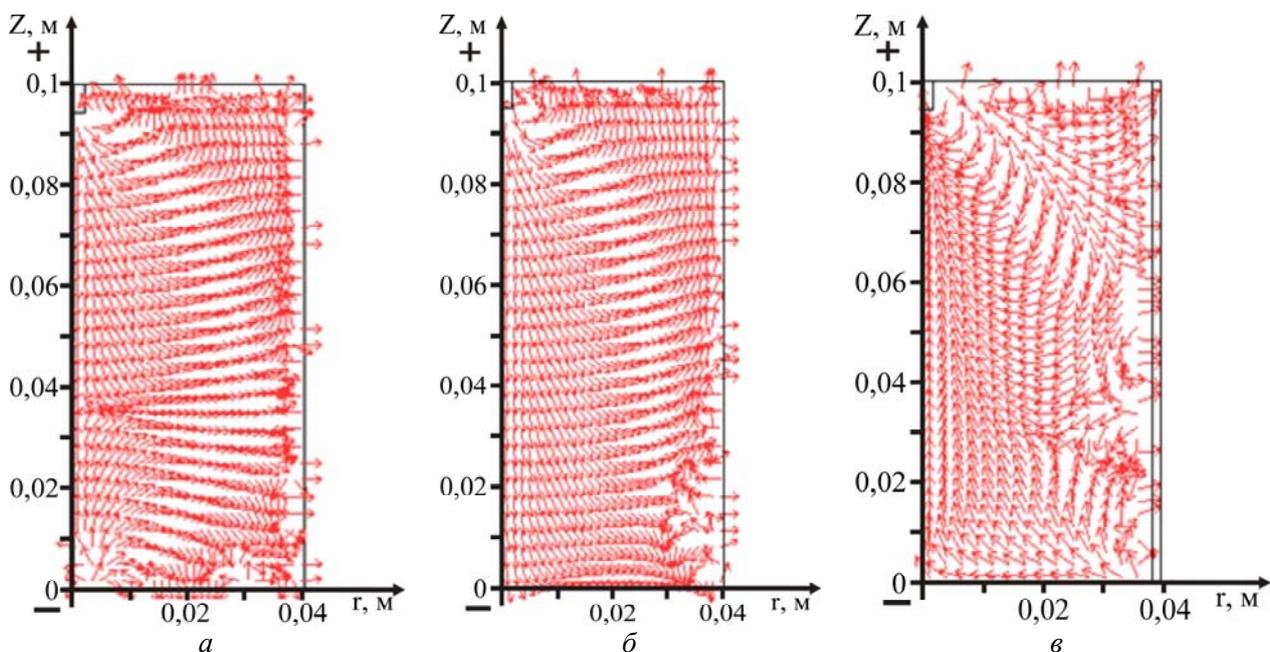


Рис. 5. Поля скоростей в жидкометаллическом проводнике в момент достижения током первого максимума (изолированный погружной электрод; $U_0 = 30$ кВ; $C = 1$ мкФ; $L = 2$ мкГн): а – «острие–острие»; б – «острие–плоскость»; в – «острие–стенки»

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе экспериментальных исследований оценивали влияние напряжения зарядки накопителя U_0 как одного из самых значащих по воздействию на ЭВТ технологических параметров и типа электродной системы на характеристики проводника, закристаллизовавшегося после пропускания импульсного тока. При этом исходили из металлургических представлений, что из хорошо перемешанной жидкости образуется макроскопически изотропная и однородная по химическому составу структура. Наряду с измельчением зерна твердого раствора это обеспечивает понижение содержания водорода, повышение плотности литого металла и улучшение механических свойств.

Таблица 3. Характеристики сплава АК9 ($C = 1$ мкФ, $L = 2$ мкГн), электродная система «острие–острие»

U_0 , кВ	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Средний диаметр макрозерна D , мкм
Без обработки	150	2	42
14	150	5	41
20	165	5	40
30	190	6	36,5

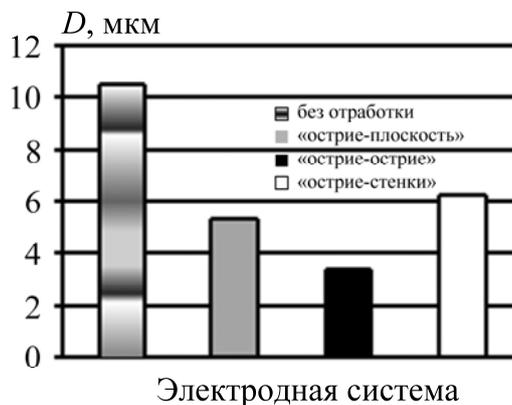


Рис. 6. Диаметр макрозерна в сплаве АК7 ($U_0 = 30$ кВ, $C = 1$ мкФ, $L = 2$ мкГн)

Соблюдая условия, принятые при математическом моделировании, обрабатывали алюминиевые расплавы АК9 и АК7, физические характеристики которых (удельную проводимость, плотность, вязкость) можно считать одинаковыми. Импульсы тока пропускали с частотой 2 Гц в течение 1 минуты.

В табл. 3 и на рис. 6 приведены характеристики структуры и свойств сплавов, которые дают представление об эффективности импульсной электротокковой обработки. Видно, как зеренная структура и механические свойства сплавов улучшаются с увеличением U_0 , то есть с ростом силы тока в импульсе. И предпочтительной в этом отношении является электродная система «острие–острие», что косвенно подтверждает результаты моделирования ЭВТ.

ВЫВОДЫ

Отмечено, что электрические параметры разрядной $R-L-C$ цепи и системы токоподвода к расплаву являются управляемыми технологическими параметрами, с помощью которых можно реализовать контролируемый процесс перемешивания проводящей жидкости при пропускании через нее импульсов тока. С одной стороны, это определяет широкие технологические возможности метода импульсной токовой обработки реальных литейных расплавов: интенсификацию ЭВТ в стационарной емкости для перемешивания за счет наращивания электрических параметров и за счет варьирования электродными системами при определенных электрических параметрах, например если энергетические возможности источника тока ограничены. С другой стороны, возникает задача сведения множества влияющих на ЭВТ параметров к единому универсальному, использование которого позволит принимать оптимальные решения для эффективной обработки расплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков Н.А., Чердовских П.П. Распределение электрического тока в ванне дуговой печи. М.; Л.: Энергия, 1966. 104 с.
2. Мошняга В.Н., Шарамкин В.И. Экспериментальное исследование электровихревого течения в цилиндрической емкости. *Магнитная гидродинамика*. 1980, (1), 77–80.
3. Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И., Щербинин Э.В. *Электровихревые течения*. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.
4. Казак О.В., Семко А.Н. Электровихревые течения в осесимметричных сталеплавильных печах постоянного тока с подовым электродом. *Вестник Донецкого национального университета. Сер. А: Природничі науки*. 2010, (2), 116–122.
5. Жилин В. М., Ивочкин Ю. П., Оксман А.А. Исследование тепловых и гидродинамических эффектов, сопровождающих растекание электрического тока в объеме жидкого металла. *VI Minsk International Heat and Mass Transfer for UM MIF 2008. Proceedings*. (Minsk, May 19–23, 2008). Minsk, 2008. P. 9–16.
6. Борисов Г.П., Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. О высоковольтной электроимпульсной обработке расплава. *Металлургия машиностроения*. 2010, (5), 33–39.
7. Ivanov A.V., Sinchuk A.V. and Bogoslavskaya A.S. A Study of the Electromagnetic and Hydrodynamic Processes in a Liquid-metal Conductor Exposed to Current Pulses. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011, **48**(1), 28–34.

Поступила 07.07.11

Summary

It is shown, that the voltage of the capacitor integrator the capacity of the integrator, inductance of a discharge contour and the type of electrode system are the important technological parameters, that alongside with magnitude of a current in an impulse, defining character of electrovortical currents, value of magnetic pressure and speed of mixing a liquid metal conductor during passing a pulse current through it. The most effective among the investigated electrode systems for processing a cylindrical conductor is the system «an edge – an edge», providing intensive mixing the melt, favorable structure and the improved complex of mechanical properties of alloys after crystallization.