Высоковольтный электротехнический комплекс для электроразрядной обработки расплавов металлов с повышенной интенсивностью электросилового воздействия и перемешивания

А. А. Щерба[а], А. В. Иванов[б]

[а]Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: sh1ch@ied.org.ua
[б]Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: dpta@iipt.com.ua

Развиты принципы построения высоковольтных электротехнических комплексов электроразрядной обработки расплавов металлов, позволяющие реализовать повышенные локальные электросиловые воздействия. Разработаны методы интенсификации электромагнитных и гидродинамических процессов в обрабатываемом расплаве за счет создания в нем локальных областей усиления электромагнитного поля, получаемого при наличии прямых и вторичных (отраженных) силовых взаимодействий. Реализовано управление процессами электросилового давления на расплав и его перемешивание, основанное на изменении параметров электроразрядной цепи, камеры и электродной системы. Наиболее эффективной признана электродная система типа «острие–острие», обеспечивающая наиболее интенсивное перемешивание расплава, благоприятную структуру и улучшенный комплекс механических свойств сплавов после кристаллизации.

Ключевые слова: электроразрядная система, электротехнический комплекс, импульс, электродная система, разрядная цепь, ток, магнитное давление, перемешивание, расплав, металл.

УДК 621.316:621.373

ВВЕДЕНИЕ

Повышение электросиловых воздействий на жидкие и кристаллизующиеся металлы при высоковольтной электроразрядной обработке (ВЭО) является одной из основных электротехнических задач, от решения которой зависит конкурентоспособность такого метода и разрабатываемых на его основе технологий. Необходимость совершенствования высоковольтных электротехнических комплексов для реализации новых технологий ВЭО расплавов металлов с целью повышения их качества и эксплуатационных свойств показана в работах [1–6].

Эффективность большинства технологий электромагнитной обработки твердых металлов во многом определяется скоростью достижения необходимых максимальных температур и допустимых градиентов в исходных заготовках [9, 11], а жидких металлов – внутренними силовыми воздействиями и вихревыми течениями [1–6, 11, 12]. Управление процессами обработки расплавов металлов электроразрядными импульсами обычно производят регулированием их энергетических и динамических характеристик, а также изменением параметров и конфигурации разрядной камеры с жидким металлом, электродной системы и других узлов разрядного контура. Возможность регулировать такие параметры разрядных импульсов высоковольтных электротехнических комплексов, как энергия и частота следования импульсов, максимальное значение и скорость нарастания тока, его длительность и форма, а также изменять конфигурацию технологического узла обусловливают большой функциональный потенциал метода ВЭО расплавов.

В то же время расчет оптимальных параметров разрядных импульсов часто усложняется необходимостью анализа взаимозависимых переходных процессов в цепях электроразрядных установок при стохастическом изменении сопротивления нагрузки [7, 10]. Необходимо также иметь в виду, что во многих случаях размеры и конфигурации разрядной камеры и электродной системы могут так измениться, что в расплаве за счет учета взаимодействия прямых и вторичных (отраженных от стенок) электрогидравлических волн станет возможным реализовывать интерференционные явления, при которых возникают локальные области дополнительного усиления электромагнитных воздействий на расплав [8]. Электротехнологические комплексы, в которых такие взаимодействия позволяют интенсифицировать электрогидродинамические процессы обработки сред и изделий, называют компактными.

Результаты, полученные в работах [1–6, 8, 11, 12], подтверждают, что при формировании импульсных токов величиной 10^4–10^6 А,

© Щерба А.А., Иванов А.В., Электронная обработка материалов, 2014, **50**(2), 108–116.

длительностью 10^1–10^3 с и скоростью нарастания до $5\cdot10^9$ А/с в ограниченных объемах металлических расплавов имеют место сильные взаимодействующие первичные и вторичные магнитогидродинамические воздействия и активно выделяется джоулево тепло. Интенсивность таких явлений в основном и определяет эффективность электрогидродинамической обработки жидких металлов. Один из подходов, позволяющих дополнительно интенсифицировать процессы такой обработки, – это установление размеров и конфигурации электроразрядных систем, при которых возможно возникновение дополнительного усиления силовых возмущений на металл согласно принципу, описанному в работе [8].

Приведенные обстоятельства вызывают необходимость системного рассмотрения взаимосвязанных электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов при прохождении импульса тока через жидкометаллический проводник и определения факторов, влияющих на интенсивность протекающих процессов и в конечном итоге – на эффективность ВЭО расплавов и кристаллизующихся металлов.

Схематически высоковольтный электротехнический комплекс для ВЭО кристаллизующихся расплавов представлен на рис. 1.

В данной схеме выделены три основные системы, такие как зарядная (ЗС), электроразрядная (ЭРС) и система управления (СУ), каждая из которых при определенных допущениях может быть рассмотрена по отдельности или же совместно в разных сочетаниях, что дает широкие возможности по совершенствованию электротехнического комплекса в целом. И если вопросы совершенствования ЗС и СУ широко освещены в литературе, а принципы модернизации этих систем легко переносятся для различных разрядно-импульсных технологий обработки материалов, то ЭРС, которая в большинстве случаев определяет эффективность того или иного способа обработки, зачастую имеет существенные различия в принципах воздействия на объект обработки и требует отдельного рассмотрения для каждой технологии. Электроразрядная система, представленная на рис. 1, включает в себя накопительный конденсатор C, высоковольтный коммутатор K, а также соединительные кабели и шины с собственными значениями индуктивности и емкости ($L_ц$ и $C_ц$), электродную систему и непосредственно сам расплав.

Процесс формирования электромагнитного, гидродинамического и теплового воздействия при прохождении импульса тока через обрабатываемый расплав в такой ЭРС можно условно разбить на несколько этапов:

– вытеснение тока и магнитного поля к поверхности проводника и их концентрация в слое толщиною δ;

– действие на расплав объемных электромагнитных сил $\vec{F}_{эм}$, возникающих при взаимодействии проходящего через расплав импульса тока I и индуцированного им магнитного поля H, направленных от периферии к центру проводника с током, воздействие джоулева тепла Q, которое вызывает изменение температуры кристаллизующегося расплава ΔT;

– сжатие проводника магнитным давлением $P_м$ и возбуждение в нем электровихревых течений $V_ж$.

Электротехнологическими параметрами, влияющими на эффективность ВЭО, являются:

– характеристики импульсного тока, воздействующего на обрабатываемый расплав;

– размеры и конфигурация электродной системы и электроразрядной камеры;

– электротермодинамические характеристики расплава при заданной температуре.

Цель данной работы – определение влияния электрических параметров высоковольтных электротехнических комплексов, а также конфигурации электродной системы и электроразрядной камеры на эффективность электрогидродинамической обработки жидких металлов, а также разработка методов дополнительной ее интенсификации.

В связи с наличием множества нелинейных зависимостей для достижения поставленной задачи применялись методы численного математического и физического моделирования.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Постановка задачи

В работе рассматривался процесс протекания одиночного разрядного импульса тока через жидкий алюминиевый проводник при температуре 700°С [5, 6]. Проводник имел форму цилиндра высотой H_0 = 100 мм и радиусом R_0 = 40 мм. Форма импульса тока $I(t)$ задавалась функцией затухающей синусоиды:

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

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$^{-1}$.

Были рассмотрены три наиболее технологичные электродные системы, с помощью которых

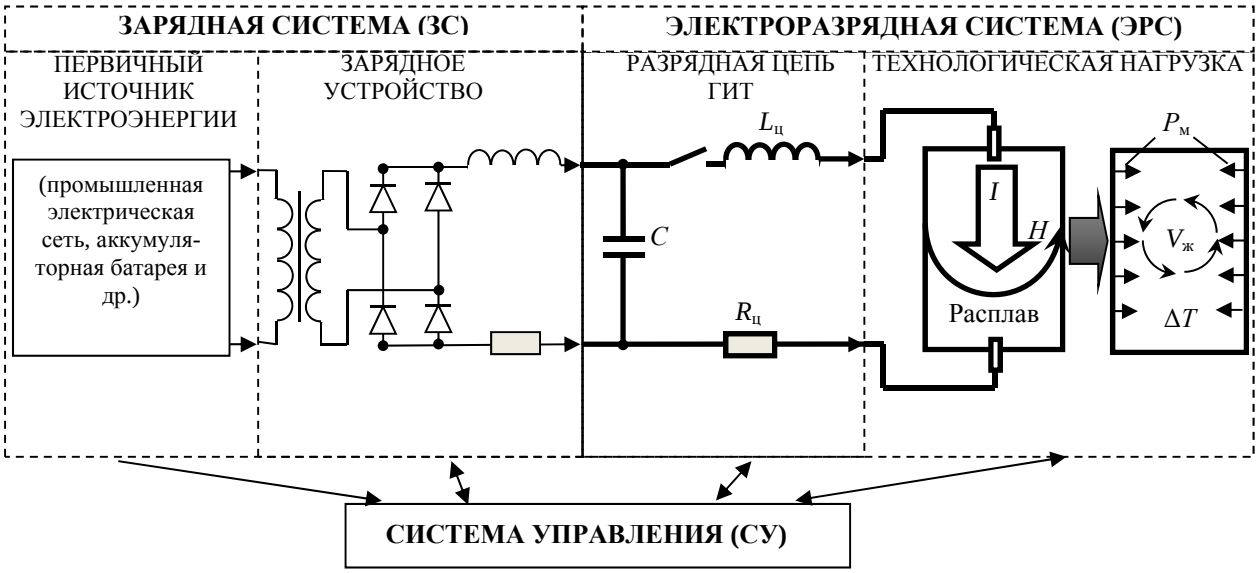


Рис. 1. Высоковольтный электротехнический комплекс для ВЭО электроимпульсной обработки кристаллизующихся расплавов.

производится токоподвод к жидкому проводнику.

Электродная система «острие–острие» (О-О) – система для обработки расплава в емкости, выполненной из непроводящего материала. Состоит из верхнего погружаемого и нижнего неподвижного электродов с равными радиусами R_e = 3 мм. Материал электродов – медь.

Электродная система «острие–плоскость» (О-П) − система для обработки расплава в емкости с футерованными непроводящими боковыми стенками. Роль противоэлектрода выполняет открытое металлическое дно емкости ($R_e = R_0$ = 40 мм).

Электродная система «острие – проводящие стенки» (О-ПС) − система для обработки расплава в емкости с проводящими боковыми стенками и изолированным внутри дном.

Моделирование электромагнитных процессов в жидком металле производилось с помощью численных конечно-разностных методов решения дифференциальных уравнений Максвелла с граничными условиями, сформулированными в работах [3, 5, 11]. При моделировании использовалось безындукционное приближение, то есть электромагнитное поле и гидродинамические процессы рассматривались как взаимно независимые друг от друга.

Напряженность магнитного поля $\vec{H}_\varphi$ находилась из известного уравнения Максвелла, записанного в цилиндрической системе координат (Z, r, φ), как и в работе [11]:

$$\mu_0\mu\frac{\partial\vec{H}_\varphi}{\partial t}+\nabla\times(\sigma^{-1}(\nabla\times\vec{H}_\varphi-\vec{J}^{\,e})-\vec{\upsilon}\times(\mu_0\mu\vec{H}_\varphi)=0, \qquad (2)$$

где ∇ – оператор Гамильтона; $\vec{\upsilon}$ – скорость объекта, м/с; $\vec{J}^{\,e}$ – плотность наведенных токов, А/м^2; μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость, μ = 1; σ – удельная проводимость металла (Ом·м)$^{-1}$.

Величина магнитного давления $P_м$ определялась из выражения

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

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

$$\frac{\partial\vec{\upsilon}}{\partial t}=-(\vec{\upsilon}\cdot\nabla)\vec{\upsilon}+\gamma\Delta\vec{\upsilon}-\frac{1}{\rho}\nabla P_м+\frac{\vec{F}_{эм}}{\rho}, \qquad (4)$$

где $\vec{F}_{эм}$ – объемная электромагнитная сила, Н/м^3; γ − коэффициент кинематической вязкости, м^2/с; ρ − плотность расплава, кг/м^3.

Для расчета температурного поля была рассмотрена задача нестационарной теплопередачи в полом цилиндре бесконечной длины и толщиной стенки, равной толщине скин-слоя [5, 11]. В таком случае температура изменяется только по радиусу цилиндра, оставаясь постоянной по высоте. Со стороны внутренней поверхности цилиндра находится расплав Al, а с внешней – стенки ковша. Физические свойства скин-слоя выбирались соответственно свойствам расплава алюминия. Материалом ковша служила сталь Ст3 (ГОСТ 380-2005), электропроводность которой существенно меньше электропроводности алюминия. В реальных условиях внутренние стенки ковша «футеруются», что обеспечивает надежную изолирующую прослойку между расплавом и стальной стенкой.

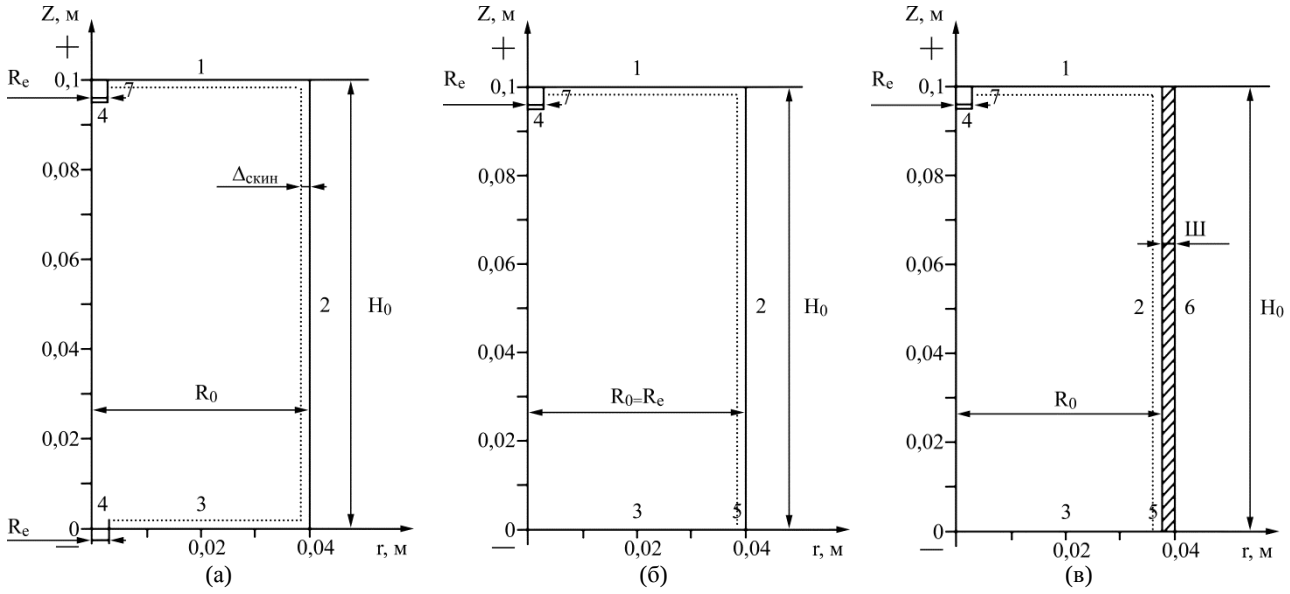


Рис. 2. Геометрическая модель жидкометаллического проводника: (а) – О-О; (б) – О-П; (в) – О-ПС.

Уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат записывалось в виде

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_r r\frac{\partial T_p}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial r}z\left(\lambda_z r\frac{\partial T_p}{\partial z}\right)=-q-C_m\rho\frac{\partial T_p}{\partial t}, \qquad (5)$$

где T_p – температура, К; $\lambda_{r,z}$ – компоненты тензора теплопроводности, Вт/(м·К); q – удельная мощность тепловыделения, Дж/кг; C_m – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К).

Количество тепла Q, выделившегося в скин-слое расплава, определялось как

$$Q=\int_0^{\tau_{имп}} J^2\cdot\sigma^{-1}dt, \qquad (6)$$

где J – плотность тока, А/м^2; $\tau_{имп}$ – длительность импульса, с.

Принималось, что плотность сторонних токов $J^e = 0$, а на оси Z $H_\varphi = 0$. Начальные условия задавались следующим образом: $H_\varphi\big|_{t=0}=0$; $I\big|_{t=0}=0$; $\nu\big|_{t=0}=0$, как в работе [11].

Геометрические модели используемых электродных систем приведены на рис. 2.

Граничные условия электромагнитной задачи: *1* – зеркало расплава; *2* – внешняя боковая поверхность проводника; *3* – нижняя торцевая стенка проводника; *4* – электрод и противоэлектрод; *5* − область стекания тока; *6* – внешняя боковая стенка проводящей емкости; *7* – боковая поверхность электрода; *Ш* – проводящая стенка емкости толщиной 0,005 м (приведено в табл. 1). При решении гидродинамической задачи было принято допущение, что расплав приходит в движение только под воздействием электромагнитной силы и скорости на стенках и других поверхностях, равных 0.

Некоторой исходной точкой служили значения U_0 = 30 кВ; C = 1 мкФ; L = 2 мкГн, при которых в работе [2] получены положительные измерения структуры и свойств алюминиевого сплава. Параметры разрядного контура ГИТ выбирались следующие:

– емкость конденсатора C изменялась от 0,25 до 5 мкФ;

– напряжение заряда конденсатора U_0 – от 10 до 50 кВ;

– индуктивность разрядного контура L – от 1 до 8 мкГн.

Были проанализированы амплитуда и характер электросилового давления и перемешивания обрабатываемого расплава. Указанные диапазоны изменения электрических параметров реализовывались высоковольтными ГИТ, разработанными в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины (г. Николаев). Такие ГИТ позволяли формировать в расплавах металлов импульсные токи, максимальное значение которых I_{max} изменялось от 3,5 до 80 кА, а период колебаний $T_к$ – от 3 до 40 мкс.

Результаты моделирования

Дифференциальные уравнения решались с применением метода конечных элементов, реализованном в пакете программ Comsol Multiphysics (см. http://www.comsol.com).

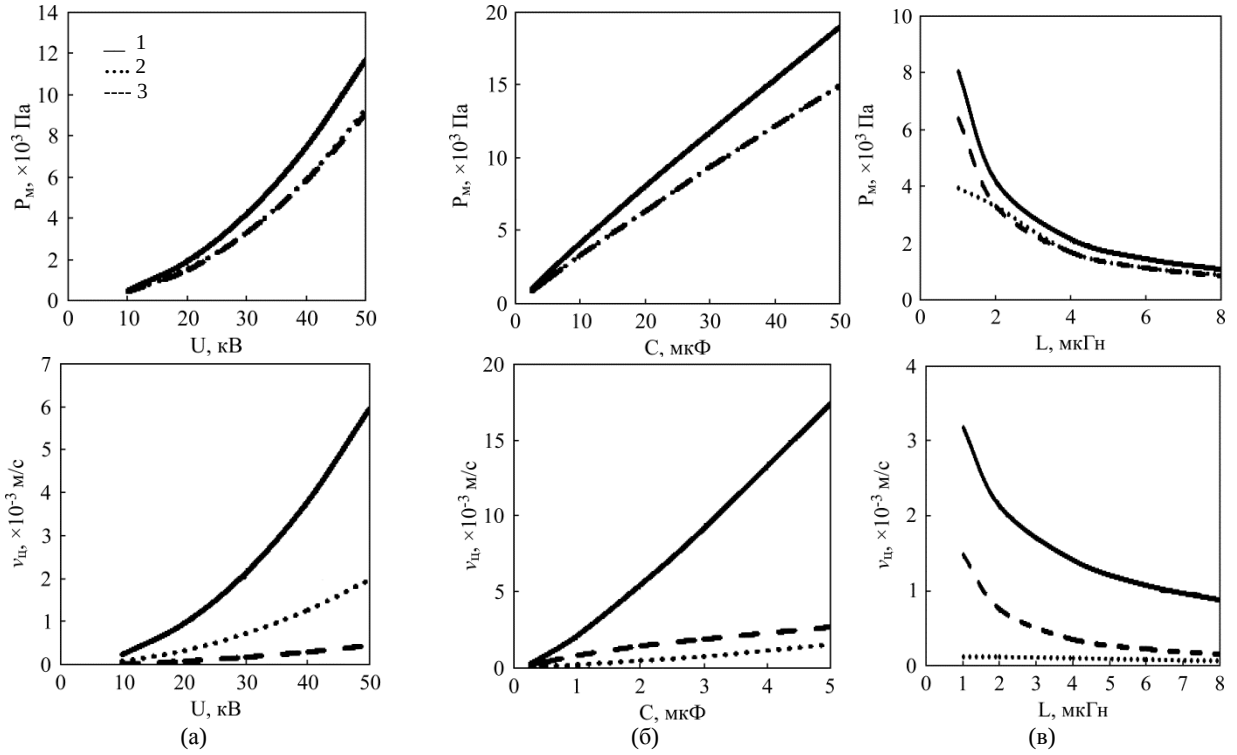
На рис. 3 приведены зависимости максимального магнитного давления на боковую поверхность цилиндрического проводника и максимальных скоростей движения в центральном диаметральном сечении проводника для электродных систем О−О, О−П и О-ПС от параметров разрядного контура U_0, L и C.

Видно, что магнитное давление и скорости перемешивания почти прямо пропорциональны напряжению заряда и емкости конденсатора C и обратно пропорциональны индуктивности разрядного контура. Регулирование величин напря-

Таблица 1. Граничные условия

	О-О	О-П	О-ПС
Область 1	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)}{2\cdot\pi\cdot r}$	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)}{2\cdot\pi\cdot r}$	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)}{2\cdot\pi\cdot r}$
Область 2	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)}{2\cdot\pi\cdot R_0}$	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)}{2\cdot\pi\cdot R_0}$	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)}{2\cdot\pi\cdot R_0}$
Область 3	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)}{2\cdot\pi\cdot r}$	$\vec{H}_\varphi = 0$	$\vec{n}\times\vec{E} = 0^{**}$
Область 4	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)\cdot r + \Delta_{\text{скин}}}{2\cdot\pi\cdot R_e^{\,2}\cdot\Delta_{\text{скин}}}$	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)\cdot r}{2\cdot\pi\cdot R_e^{\,2}}$	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)\cdot r}{2\cdot\pi\cdot R_e^{\,2}}$
Область 5	–	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)\cdot(r - R_0 + \Delta_{\text{скин}})}{2\cdot\pi\cdot R_0\cdot\Delta_{\text{скин}}}$	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)\cdot(r - (R_0 + Ш) + \Delta_{\text{скин}})}{2\cdot\pi\cdot(R_0 + Ш)\cdot\Delta_{\text{скин}}}$
Область 6	–	–	$\vec{H}_\varphi = \frac{I(t)}{2\cdot\pi\cdot(R_0 + Ш)}$
Область 7*	$\vec{H}_\varphi = 0$	$\vec{H}_\varphi = 0$	$\vec{H}_\varphi = 0$

* изолированная боковая поверхность погружного электрода; ** $\vec{E}$ – напряженность электрического поля; $\vec{n}$ – нормаль.



1 – О-О; 2 – О-П; 3 – О-ПС

Рис. 3. Магнитное давление на боковой поверхности и максимальные скорости течений в центральном диаметральном 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.

жения заряда конденсатора U_0 и его емкости C позволяло изменять магнитное давление и скорости течения в расплаве в 10 раз и более (при применении электродной системы О-О). Варьирование величины индуктивности L изменяло магнитное давление и скорости перемешивания расплава в гораздо более узком диапазоне, что позволяло увеличивать индуктивность разрядного контура за счет удлинения его проводов без ухудшения процессов перемешивания.

Отметим также, что в соответствии с данными, полученными ранее [5], процесс перемешивания расплава существенно зависит от того, каким набором U_0, L, C реализуется одна и та же сила тока в импульсе. Импульсы, сформированные за счет изменения емкости или индуктивно-

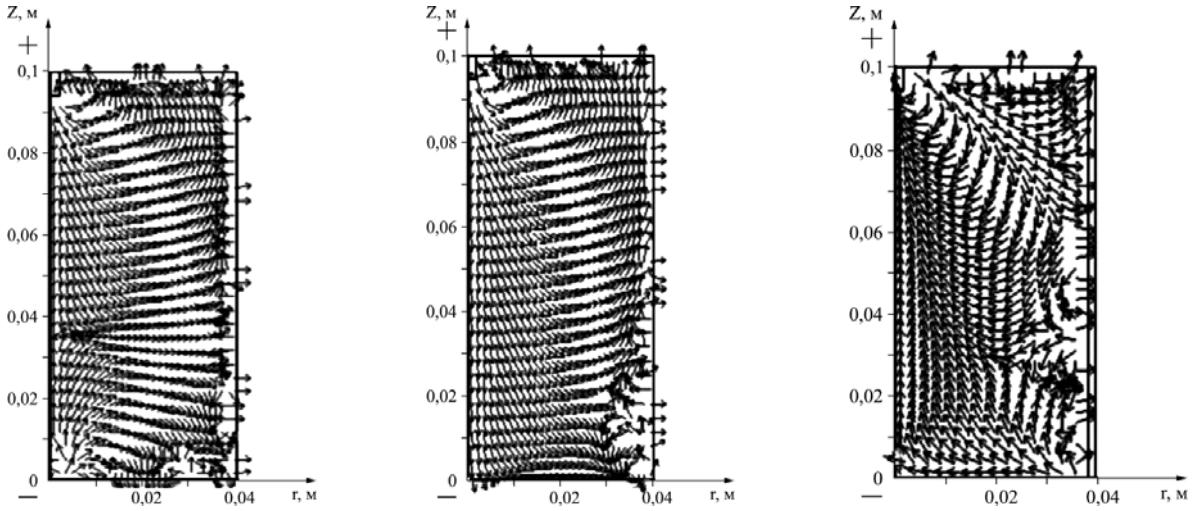


Рис. 4. Поля скоростей в жидкометаллическом проводнике в момент достижения током первого максимума (неизолированный погружной электрод; U_0 = 30 кВ; C = 1 мкФ; L = 2 мкГн): (а) – «острие–острие»; (б) – «острие–плоскость»; (в) – «острие–стенки».

Таблица 2. Максимальные скорости течений в центральном диаметральном 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		
	О-О	О-П	О-ПС	О-О	О-П	О-ПС
$v_ц$, м/с	$2{,}34\cdot10^{-3}$	$7{,}5\cdot10^{-4}$	$7{,}6\cdot10^{-4}$	$3{,}14\cdot10^{-3}$	$5{,}4\cdot10^{-4}$	$7{,}6\cdot10^{-4}$
$v_δ$, м/с	$2{,}5\cdot10^{-3}$	$1{,}66\cdot10^{-4}$	$1{,}44\cdot10^{-3}$	$6{,}28\cdot10^{-3}$	$5{,}24\cdot10^{-4}$	$5{,}42\cdot10^{-3}$

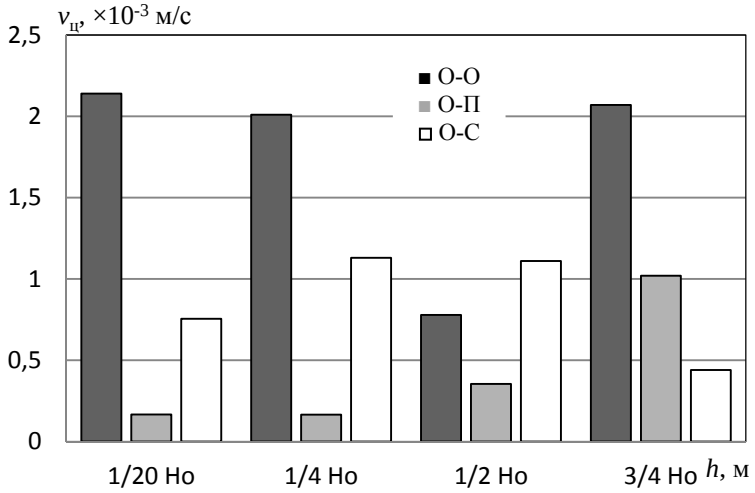


Рис. 5. Зависимость максимальной скорости течений в центральном диаметральном сечении в момент достижения током первого максимума от глубины погружения электрода (электродная система «острие−острие»; неизолированный погружной электрод; U_0 = 30 кВ; C = 1 мкФ; L = 2 мкГн).

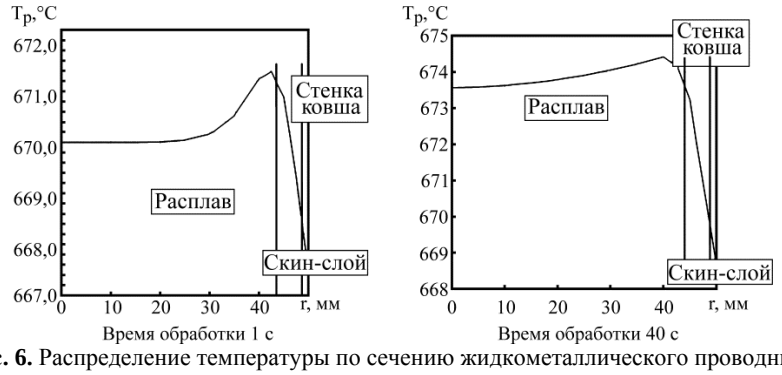


Рис. 6. Распределение температуры по сечению жидкометаллического проводника.

сти при неизменном напряжении, влекут за собой изменение частоты тока, следовательно – глубины проникновения тока и электромагнитного поля. Таким образом, несмотря на существующую взаимосвязь, характеристики разрядной цепи ГИТ U_0, L, C являются электротехнологическими параметрами, независимо определяющими интенсивность процессов гидродинамического воздействия.

На рис. 4 для различных электродных систем с неизолированным погружным электродом представлены векторные изображения течений в расплаве, параметры U_0, C и L взяты для исходной точки.

Отметим схожий характер течений для электродных систем О–П и О–ПС, образующих одноконтурное поле в основном (центральном) объеме проводника. Для О–О наблюдается двухконтурное поле скоростей течений с двумя противоположно направленными потоками в центральной части проводника. Эти потоки устремлены к центральному его сечению, в котором они сходятся, и далее жидкость движется в радиальном направлении. Турбулентность является наибольшей возле острых электродов, где напряженность электрического и магнитного полей максимальна, и в зонах, где действуют разнонаправленные силы $\vec{F}_{\text{эм}}$, то есть в углах цилиндрического проводника.

В табл. 2 представлены максимальные скорости движения расплава в скин-слое толщиной, равной v_Δ, определенные расчетным путем.

Исходя из максимальных значений скорости движения в центральном сечении проводника $v_ц$ и максимальных скоростей движения расплава в скин-слое v_Δ, представленных в табл. 2, можно утверждать, что применение электродной системы «острие – острие» обеспечивает наиболее интенсивное перемешивание расплава.

Изоляция погружного электрода не вносит принципиальных изменений в картины течений жидкого металла. Однако при отсутствии протекания тока через боковую поверхность электрода изменяются условия растекания токов и распределение магнитного поля, что сказывается на интенсивности гидродинамических процессов. Согласно расчетным данным в системах с изолированным электродом значения для $v_ц$ и v_Δ, приведенные в табл. 2, выше по сравнению с системами с неизолированным электродом.

Диаграмма, представленная на рис. 5, показывает влияние погружения неизолированного верхнего электрода в расплав h на интенсивность гидродинамических процессов в расплаве глубины, за счет чего можно увеличить скорость перемешивания расплава в несколько раз.

Отметим, что при применении различных электродных систем проявляется принципиально различный характер зависимостей $v_ц(h)$. Возможно, это связано с изменением условий растекания тока, когда с увеличением глубины погружения электрода увеличивается доля тока, проходящего через его боковую неизолированную поверхность.

Результаты численного решения электротепловой задачи приведены на рис. 6.

Приведенные в таблице результаты показали, что при амплитуде тока $I_{\max} = 22$ кА и длительности импульса $\tau = 100$ мкс, периоде колебаний $T = 10$ мкс и частоте импульсов $f = 2$ Гц за промежуток времени $\Delta t_1 = 1$ с скин-слой расплава нагревается приблизительно на 1°С, а внутренний объем расплава прогревается только на 0,5°С, то есть тепло не успевает распространиться к центру ковша. За $\Delta t_2 = 40$ с перегрев составляет примерно 4°С как для скин-слоя, так и для всего объема расплава, то есть из-за высокой теплопроводности происходит выравнивание температуры по объему расплава. Поэтому существенного перегрева всего расплава не наблюдается.

Заметим, что количество джоулева тепла можно также увеличить, изменяя значения L и C (которые определяют амплитуду разрядного тока), повышая частоту следования разрядных импульсов $f_{\text{имп}}$ или увеличивая длительность обработки, но последнее приведет к увеличению энергетических затрат на обработку.

Таким образом, расчеты показали, что перегрев всего объема за счет выделения джоулева тепла при ВЭО мал и практически не влияет на эффективность обработки по сравнению с обработкой постоянным током или переменным током высокой частоты, где перегрев локальных областей расплавов может быть большим.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Были проведены экспериментальные исследования влияния напряжения зарядки конденсатора U_0 и типа электродной системы на характеристики проводника, закристаллизовавшегося после охлаждения расплава, обработанного высоковольтными разрядными импульсами. При этом исходили из металловедческих представлений, что из хорошо перемешанной жидкости образуется макроскопически изотропная и однородная по химическому составу структура. Наряду с измельчением зерна твердого раствора это обеспечивает снижение содержания водорода, повышение плотности литого металла и улучшение механических свойств [2].

Соблюдая условия, принятые при математическом моделировании, обрабатывали алюмини-

евые 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.

На рис. 7 и в табл. 3 приведены характеристики структуры и свойств сплавов, которые дают представление об эффективности высоковольтной электроразрядной обработки.

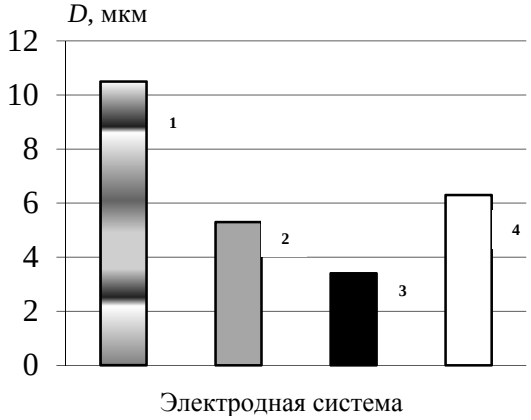


Рис. 7. Диаметр макрозерна в сплаве АК7 (U_0 = 30 кВ, C = 1 мкФ, L = 2 мкГн): 1 – без обработки; 2 – О-П; 3 – О-О; 4 – О-С.

Таблица 3. Характеристики сплава АК9 (C = 1 мкФ, L = 2 мкГн, электродная система О-О)

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

Анализ результатов, приведенных на рис. 7 и в табл. 3, показывает, что с повышением величины напряжения зарядки конденсаторов U_0 в металле, охлажденном после электроразрядной обработки, измельчается зеренная структура, наблюдается одновременное увеличение предела прочности (со 150 до 190 МПа) и относительного удлинения (с 2 до 6%). При этом наиболее высокие показатели реализуются при применении электродной системы «острие–острие», что подтверждает результаты проведенного моделирования.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что электрические параметры высоковольтных электротехнических комплексов, а также конфигурация электродной системы и электроразрядной камеры существенно влияют на эффективность электрогидродинамической обработки жидких металлов, причем эти параметры являются управляемыми электротехнологическими каналами контролируемого регулирования электромагнитного давления и перемешивания обрабатываемых расплавов.

2. Разработаны методы, позволяющие существенно интенсифицировать процессы перемешивания расплава (на 30% и более при применении электродной системы «острие–острие») за счет изменения степени неоднородности растекания тока в расплаве и распределения электромагнитного поля в его объеме, а также за счет создания дополнительных локальных областей с повышенными значениями напряженности электромагнитного поля в результате изоляции боковой поверхности погружного электрода и глубины его погружения.

3. Экспериментально подтверждена эффективность разработанных методов интенсификации процессов перемешивания и электросилового воздействия на расплав при его обработке высоковольтными разрядными импульсами. При обработке на оптимальных режимах получено одновременное увеличение предела прочности (со 150 до 190 МПа) и относительного удлинения (с 2 до 6%) и улучшение зеренной структуры обработанного металла. Подтверждены расчетные данные о степени влияния на эффективность электросилового воздействия на металлические расплавы и перемешивания электрических параметров высоковольтных электротехнических комплексов, а также конфигурации электродной системы и электроразрядной камеры. Численное моделирование и эксперименты подтверждают, что наиболее эффективной является электродная система «острие–острие».

4. Показано, что при прохождении импульсных токов до 20 кА длительностью до 100 мкс через алюминиевый жидкометаллический проводник воздействие джоулева нагрева не оказывает существенного влияния на его термодинамическое состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Б.П., Зубюк Ю.П., Шнурко В.К. *Системы электропитания магнитодинамических установок*. Киев: Наукова думка. 1994. 248 с.

2. Борисов Г.П., Цуркин В.Н., Иванов А.В. О высоковольтной электроимпульсной обработке расплава. *Металлургия машиностроения*. 2010, (5), 33–39.

3. Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И., Щербинин Э.В. *Электровихревые течения*. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.

4. Волков Г.В., Грабовый В.М., Синчук А.В. Обработка чугуна концентрированными потоками энергии. *Литейное производство*. 1998, (1), 12–14.

5. Иванов А.В., Синчук А.В., Богославская А.С. Исследование электромагнитных и гидродинами-

ческих процессов при воздействии импульса тока на жидкометаллический проводник. *ЭОМ*. 2011, **47**(1), 35–42.

6. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Ruban A.S. Effect of the Technological Parameters of the Melt Treatment by a Electric Pulse Current on the Mixing Process. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2012, **48**(2), 180–186.
7. Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Многоуровневая модель взаимозависимых переходных процессов в цепях электроразрядных установок со стохастической нагрузкой. *Технічна електродинаміка*. 2013, (5), 5–14.
8. Щерба А.А., Дубовенко К.В. *Высоковольтные электроразрядные компактные системы*. Киев: Наук. думка, 2008. 269 с.
9. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ушаков В.И. Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся слитков. *Технічна електродинаміка*. 2013, (2), 10–18.
10. Щерба А.А., Иващенко Д.С., Супруновская Н.И. Развитие метода разностных уравнений для анализа переходных процессов в цепях электроразрядных установок при стохастическом изменении сопротивления нагрузки. *Технічна електродинаміка*. 2013, (3), 3–11.
11. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Элементы численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах. Киев: Изд. Ин-та электродинамики НАН Украины, 1999. 363 с.
12. Fucheng Zhang, Ming Zhang, Bo Li, Jianhui Li. Effect of High Energy-density Pulse Current on Solidification. *Mater Sci*. 2007, **13**(2), 120–123.

Поступила 13.11.13
После доработки 03.02.14

Summary

The paper deals with the development of principles of building high-voltage electro-technical complexes for electro-discharge treatment of metal melts, which allows for realizing higher local effects of electric forces. Methods are proposed to intensify electro-magnetic and hydrodynamic processes in treated melts through the creation in the melt of the local areas of strengthening of the electromagnetic field due to direct and secondary (reflected) force interactions. A control of the processes of electro-force pressure on the melt and of its mixing is based on the change of parameters of the electro-discharge circuit, the chamber and the electrode system. The most effective system proved to be the "needle point-needle point" electrode system providing the most intensive mixing of a melt, its favorable structure and an improved complex of mechanical properties of alloys after crystallization.

Keywords: electro-discharge system, electro-technical complex, pulse, electrode system, discharge circuit, current, magnetic pressure, mixing, melt, metal.