

### ЭЛЕКТРОТОКОВАЯ ОБРАБОТКА ЖИДКИХ И КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ СПЛАВОВ В ЛИТЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

**А.В. Иванов, А.В. Синчук, В.Н. Цуркин**

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

Проблема повышения качества литой металлопродукции решается комплексом мер, предпринимаемых на всех стадиях передела в технологической цепи шихта – расплав – отливка. При этом для специальной подготовки расплава к заливке или последующей его обработки в форме используются различные технологические методы с целью гомогенизации и рафинирования металла, формирования в его объеме благоприятной кристаллизационной способности. К их числу относятся различные технологические приемы, в основу которых положено воздействие на расплав физических полей различной природы. Функциональные возможности этих способов многоплановые и многоцелевые. Но нет единого универсального метода, одинаково эффективно воздействующего на металлы различного химического состава. Современное состояние данного вопроса – это и совершенствование каждого традиционного метода, и поиск альтернативных технологических приемов обработки. Одним из таких новых методов является обработка жидкого и кристаллизующегося металла электрическим током. К сожалению, эти работы не получили широкого инновационного развития, так как теоретические аспекты вопроса пока находятся в стадии сбора экспериментальной информации. Хотя некоторые авторы попытались сделать предположения о возможных механизмах электротокковой обработки (ЭТО).

Физический принцип обработки органических и неорганических материалов электрическим током основан прежде всего на его термосиловом воздействии на объект обработки. Термовоздействие изменяет внутреннюю энергию объекта обработки, силовое – деформирует его структуру. Кроме того, известно много работ, в которых показано влияние упорядоченного движения зарядов на химические процессы, перестройку процессов переноса тепла, диффузию и т.д. С учетом того обстоятельства, что процесс прохождения тока реализуется на атомарном/электронном уровнях материала, важно отметить широкие возможности ЭТО в перестройке атомарной/молекулярной структуры объекта обработки, что сказывается на изменении его структурно-чувствительных свойств на микроуровнях.

Жидкие или кристаллизующиеся металлические материалы не являются механической смесью атомов. В зависимости от их химического состава доминируют различные типы связей на атомарном уровне. Кроме того, реальный расплав содержит неметаллические включения и газы, а в процессе кристаллизации активируются фазовые переходы I и II рода. Но для металлических систем характерно то, что все процессы, протекающие в сплавах в температурных интервалах жидкого состояния и состояния кристаллизации, связаны с подвижностью атомов, параметры которой при наложении электрического поля существенно меняются [1–3]. Вместе с тем необходимо отметить, что для такой сложной многофакторной многопараметрической системы, как металлический сплав, сложно определить принципы и параметры избирательного внешнего воздействия, в том числе и электрическим током.

Технически принцип ЭТО жидких и кристаллизующихся металлов и сплавов реализуется включением объекта обработки в электрическую цепь в виде нагрузки. Контакт обеспечивается специальными токоподводами, которые в литературных источниках называют электродами. К сожалению, авторами практически не анализируются принципы выбора мест расположения электродов в объекте обработки, их геометрия и материал. Источник тока в электрической цепи может иметь различное назначение в плане формирования характера протекающего в объекте обработки тока: постоянный, переменный, импульсный. Но в литературных источниках практически отсутствуют данные о принципах выбора источника, учитывающих технические, технологические и экономические факторы метода обработки.

Цель работы – систематизация разрозненной информации на примере отдельных опубликованных данных о методе электротокковой обработки расплавов для определения общих и индивидуальных признаков его функциональных возможностей. При этом анализ проведен с учетом характера обрабатываемого расплава тока: постоянный, переменный и импульсный.

Из справочных источников приведем дефиницию этих понятий.

Постоянный ток характеризуется неизменными во времени силой, направлением и активным сопротивлением нагрузки. Переменный представляет собой вынужденные (синусоидальные) колебания тока в электрической цепи с частотой  $\omega$ , совпадающей с частотой вынуждающей ЭДС. При этом кроме активного сопротивления возникают индуктивное и емкостное, а также ЭДС самоиндукции. То есть действие переменного тока на объект обработки функционально является более многофакторным, чем постоянного.

Импульсный ток характеризуется существенно нелинейным кратковременным характером протекания, который обеспечивается разрядкой накопителя электрической энергии на нагрузке. Такие электроразрядные процессы в различных средах насыщены многофакторными взаимообусловленными процессами, характер и параметры которых до сих пор активно изучаются. С учетом того, что временной параметр импульса электроразрядного тока может иметь порядки менее  $10^{-3}$  с, для многих электроразрядных технологий используют нагружение объекта обработки импульсами, периодически повторяющимися с заданной частотой. Такой вид ЭТО в данной статье назовем импульсно-периодическим.

### **Обработка жидкого и кристаллизующегося металла постоянным и переменным электрическим током**

Активное изучение метода ЭТО металлических материалов в жидком и жидкокристаллическом состояниях началось во второй половине XX века. Пионерскими работами здесь были исследования, в которых применяли режим постоянного тока. Полученные результаты свидетельствовали о достаточной эффективности ЭТО [1–16], что было показано на широком классе сплавов, отличающихся химическим составом.

Эффект обработки проявлялся в увеличении плотности, прочности и пластичности литого металла, частичном удалении неметаллических примесей и глубокой дегазации расплава. Обнаружены положительные эффекты по компактизации железистой фазы в алюминиевых сплавах [13, 14], по замедлению процессов образования пригара на поверхности формы, что выражается в снижении шероховатости поверхности отливки на 30% [4]. Отмечен эффект сокращения времени затвердевания металла [3]. Но наиболее важным результатом является экспериментально обнаруженный факт активного влияния электрического тока на кинетику растворения химических элементов, активизацию модификаторов и проявление эффекта объемной кристаллизации металла. Причем наибольшая эффективность ЭТО достигается при обработке кристаллизующегося металла, что может объясняться увеличением скачка потенциала на границе фаз [16], который приводит к существенной трансформации распределения электромагнитного поля в проводящей среде [17], а значит, к возникновению локальных зон искажения термосилового поля, генерируемого электрическим током.

Рядом авторов предложены гипотезы, поясняющие пока дискуссионные механизмы ЭТО [8–10, 13, 14, 16], которые сводятся к тепловому воздействию электрического тока, активации электронов проводимости, изменению поверхностного заряда, активационному влиянию на центры кристаллизации. В работе [13] экспериментально показано сокращение температурного интервала кристаллизации при одновременном увеличении времени кристаллизации. Физическое же действие переменного тока приводит к появлению магнитного поля в металле, а значит, к появлению электродинамических сил, вызывающих магнитное давление [18–23]. Но детального сопоставления по различным показателям воздействия постоянного и переменного тока в литературных источниках не обнаружено. Поэтому сегодня говорить о предпочтительности того или иного принципа нагружения металлической среды пока рано.

Накопленные к настоящему времени экспериментальные результаты и развитые основы теории жидкого состояния свидетельствуют о том, что сплавы относятся к сложным в структурном отношении системам, в которых ярко проявляются элементы упорядочивания различного масштабного уровня, микронеоднородности и микрогетеронеоднородности (ликвации). Поэтому структурные и фазовые изменения в жидких металлических системах прежде всего должны происходить на атомарном и электронном уровнях, имеющих линейные масштабы порядка  $10^{-9}$  м и временные масштабы от  $10^{-12}$  до  $10^{-14}$  с. Электрический ток – это процесс переноса заряда именно на этих масштабных уровнях, что позволяет предположить широкие функциональные возможности ЭТО.

Как отмечается в работе [21], структура жидкости носит статистический характер и ее структурные единицы можно представить в виде системы большого канонического ансамбля и включений  $g$  мономеров. При флуктуациях в заданном объеме в таких системах дисперсия  $(\Delta g)^2$  определяется средним числом атомов ( $g_a$ ) как  $(\Delta g)^2 = g_a$ , а флуктуация объема  $((\Delta V_a)^2)^{1/2}$ , число атомов ( $g^{1/2}$ ) и относительная флуктуация объема ( $\delta_v$ ) связаны соотношением  $\delta_v = ((\Delta V_a)^2)^{1/2}/V = 1/g^{1/2}$ . Объем жидкости ( $V_1$ ) флуктуирует в пределах существования жидкой фазы, и при достижении равновесного объема твердой фазы ( $V_2$ ) происходит скачкообразное изменение состояния вещества. Общее движение структурной единицы системы можно представить как поступательное перемещение ее центра инерции и движение частей частицы относительно этого центра. Последнее при наличии потенциального поля может быть как колебательным, так и вращательным. И для активации процесса кристаллизации под действием поля можно рассматривать ситуацию с минимальной частотой собственных свободных колебаний частиц системы. По предложенной методике в работе [21] выполнены расчеты таких частот для различных видов движения структурных единиц жидкой фазы при температурах кристаллизации. Они лежат в пределах:

- а) для кооперативных вращательных движений – от 10 до  $10^3$  кГц;
- б) для собственных вращательно-поступательных движений – от 1 до  $10^4$  кГц;
- в) для вращательных движений малой структурной единицы – от 1 до  $10^5$  кГц.

В качестве малой структурной единицы принята первая координационная сфера, большой – сиботаксис (кластер). Этот важный результат свидетельствует о том, что нагружение расплава для изменения атомарной структуры должно проводиться в указанном диапазоне частот, чтобы обеспечить резонансные эффекты. Выполненные в [21] эксперименты проводились при кристаллизации и охлаждении до комнатной температуры с пропусканием тока определенной частоты и формы. Режимы мощности – от 1 до 10 Вт, частотные режимы – от 20 до 8000 Гц, что коррелирует с расчетными данными. Эффект механизма столь слабого воздействия электромагнитного поля начинает проявляться в скин-слое, который генерирует ультразвук в результате действия индукционного и магнитного механизмов электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМАП). Эффективность такого преобразователя по КПД очень мала. Но металлическая система содержит внутренние и внешние источники и стоки энергии, склонные к самоорганизации (автоволны) и полирезонансному отклику на внешнее возмущение. Таким образом, за счет акустических волн в расплаве возможно появление протяженных цепочек (кластеров перколяции) и, следовательно, изменение механизмов теплопередачи. То есть частоты внешнего воздействия играют «сигнальную» организационную роль в большом каноническом ансамбле металлической системы, результатом чего являются выравнивание температуры, пространственное усреднение и изменение макрохарактеристик металла. Следует отметить, что похожие эффекты описаны и для плазмы [24].

В работе [20] показано, что механические свойства чугуна, обработанного в жидком состоянии, улучшаются с увеличением частоты пульсирующего тока. Представлены данные промышленной апробации метода высокочастотной токовой обработки в режиме ЭМАП [22]. Диапазон частот – от 50 до 250 кГц. Обработывались отливки сложной конфигурации из сплавов АМг5Мц и ЦА4М1 (при литье под давлением). Эффект воздействия проявлялся в повышении степени однородности структуры и улучшении эксплуатационных свойств. Превалирующее влияние частоты импульсов тока, которая изменялась от 50 до  $5 \cdot 10^5$  Гц, на трансформацию структуры силуминов показано и в работе [23]. Отмечено, что частота тока в большой степени определяет размер первичных кристаллов кремния и равномерность их распределения.

Заметим, что резонансное воздействие электромагнитных полей отмечается не только при обработке расплавов, но и при термической обработке сталей [25]. Сделан вывод о том, что кратковременное воздействие слабых переменных магнитных полей приводит к ускорению процессов рекристаллизации и фазовых превращений и вызывает значимые изменения микроструктуры сталей. То есть протекают процессы, как при термоциклировании.

Опыт приложения электрического потенциала к расплаву через фурму при конвертерной плавке, развиваемый в Институте черной металлургии НАН Украины [25–30], показал много эффектов, характеризующих токовую обработку, которые выпали из поля зрения исследователей-литейщиков. В работе использовался источник постоянного или переменного тока с электрическими параметрами сварочного аппарата. Заметим, что окупаемость данного метода в условиях комбината «Криворожсталь» составила четыре месяца, а текущие затраты не превысили 0,02 \$ США/т стали [30]. При этом увеличивается степень дожига СО до СО<sub>2</sub>, экономится чугун от 4,7 до 8,1 кг/т при одновременном увеличении количества присаживаемой извести от 1,5 до 4,2 кг/т, происходит актив-

ная дегазация металла по азоту и кислороду [29]. В работе [28] показано, что графитовый электрод имеет явные преимущества перед стальным как по показателям эффективности обработки, так и по технологичности. Но при этом важную роль играет полярность электродной системы. Фактор полярности, который не требует дополнительных технологических затрат, – ключевой в эффективности проявления процессов десульфурации и дефосфорации, что показано при анализе химического состава шлака. Причем положительная полярность электрода-стержня дает наибольшую степень десульфурации, а отрицательная – дефосфорации.

Анализ данных, полученных в результате многолетних исследований, позволил авторам этого метода предложить механизм, основанный на электрохимических процессах при обработке стального и шлакового расплава в конвертере [26, 27]. А результаты обработки четко свидетельствовали о существенном влиянии тока на такие структурно-чувствительные свойства расплава, как вязкость, поверхностное натяжение и электросопротивление.

Таким образом, активное действие силы тока в постоянном или переменном режиме проявляется практически во всех физических и физико-химических процессах, обеспечивающих эффективную кристаллизационную способность металла. Существенно немонотонное нагружение током реализуется при малых амплитудах. Основным фактором нагружения служит частотный параметр тока, вызывающий возникновение скин-слоя и электромагнитное акустическое преобразование электрической энергии. Причем это воздействие может быть отнесено к категории управляющего сигнала, величина которого не должна совпадать с величинами физических характеристик объекта нагружения.

#### **Обработка жидкого и кристаллизующегося металла импульсно-периодическим электрическим током**

Импульсно-периодический ток также использовался для обработки жидкого и кристаллизующегося металла [31–40]. При таком режиме в одном импульсе ток имеет характер затухающей синусоиды. Таким образом, его спектральная характеристика будет занимать широкую область частот в отличие от периодического тока, для которого вся энергия (теоретически) выделяется на одной частоте.

Авторы работы [31] обрабатывали кристаллизующуюся сталь, алюминиевые сплавы были объектом обработки в [32]. Обнаружены эффекты увеличения плотности литого металла, его прочности и пластичности. Предположения о механизмах импульсно-периодической ЭТО учитывали электродинамическое и электромагнитное воздействие, реализуемое при скин-эффекте. В работе [32] также сделан вывод о том, что импульсно-периодическая ЭТО дает результат, характерный для обработки постоянным током, но при энергозатратах, практически в два раза меньших.

Результаты по импульсной токовой обработке жидких и кристаллизующихся металлов представлены также в работах [33–40].

В частности, авторы работы [33] обрабатывали Fe-Cr-Ni сплав в интервале кристаллизации импульсным током плотностью от  $1 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup> и частотой  $10^4$  Гц. Получено измельчение зерна в сплаве, перераспределение содержания ферритно-аустенитных составляющих. Также сделан вывод, что наиболее подходящей для начала обработки является температура, на несколько градусов превышающая ликвидус. Работы [34–36] посвящены обработке литейных алюминиевых сплавов. Использовалось разрядное напряжение от 3 до 6 кВ. Получено измельчение первичной  $\alpha$ -фазы, изменение морфологии из столбчатой в розеточную, модифицирование частиц кремния. Здесь же выдвигается гипотеза о преимущественном воздействии импульсного тока на зародышеобразование.

В работе [37] рассмотрено влияние импульсного тока плотностью до  $10^3$  А/см<sup>2</sup> на структуру и свойства сплава системы Pb-Sn. Использовались импульсы тока в форме полусинусоиды длительностью 60 мкс, частота следования составляла 1,5 Гц. Достигнуты измельчение эвтектических колоний в сплаве, глобуляризация эвтектики. Отмечено, что с ростом плотности тока переохлаждение расплава увеличивается от 0,5 до 13 °С. В работах [38–39] кристаллизующиеся алюминиевые сплавы подвергались совместной обработке импульсным током частотой 1 кГц и статическим магнитным полем, приложенным перпендикулярно. Отмечено существенное измельчение структуры. Здесь же рассчитаны усилия, действующие на частицу зарождающейся твердой фазы со стороны магнитного и электрического полей с учетом действия гравитационной силы. Теоретически определены места (в объеме образца) стабильного образования частиц той или иной фазы.

Работу [40] можно назвать обзорной, здесь на основе анализа множества экспериментальных фактов рассматриваются наиболее вероятные механизмы действия импульсного электрического тока на металл, а также термодинамические условия образования зародыша твердой фазы. Выдвинута гипотеза, что электрический ток способствует образованию зародыша твердой фазы, если его проводи-

мость больше, чем проводимость расплава, и, наоборот, препятствует образованию зародышей с меньшей проводимостью.

Анализируя работы [33–40], следует отметить ряд особенностей. Во-первых, все авторы наряду с изменением структуры сплавов отмечают значительное увеличение пористости образцов. Во-вторых, исследования выполнены практически в лабораторных условиях на малых объемах расплава и при очень медленном, равномерном его охлаждении. Максимальный диаметр использованных тиглей для кристаллизации образцов составлял 1 см, высота – от 30 до 50 мм. При этом используемая частота импульсного тока обеспечивала его протекание практически по всему сечению, то есть без выраженного сканирования. Таким образом, реальные литейные факторы, которые обуславливают кинетику кристаллизации промышленных сплавов, остались вне внимания исследователей.

#### **Физические процессы, возникающие в расплаве при пропускании электрического тока**

Важным обстоятельством, отличающим процессы разряда электрической энергии в металлической среде от других технологических приложений генератора импульсных токов (ГИТ) в обработке материалов, является высокая проводимость объекта обработки. Таким образом, в металлическом расплаве будет реализовываться режим протекания разрядного тока, фактически соответствующий режиму короткого замыкания.

Вблизи температуры ликвидус сплава на основе алюминия имеют порядок удельного электросопротивления, соответствующий величине  $0,2 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, сплавы на основе железа –  $1,3 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Таким образом, даже для формы металлического проводника, характерной для непрерывно-литого сляба (вытянутый узкий проводник), мы будем иметь омическое сопротивление нагрузки порядка от  $10^{-4}$  до  $10^{-3}$  Ом. Обратный вариант геометрии проводника еще больше приближает режим разряда к режиму короткого замыкания. Этот фактор нужно учитывать при компоновке ГИТ. Кроме того, столь малое значение величины сопротивления не позволит ожидать без дополнительных технических приемов активного влияния Джоулева нагрева. Одним из таких приемов может быть, например, использование графитовых электродов, так как удельное сопротивление графита – порядка от  $8 \cdot 10^{-6}$  до  $20 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

Характерным фактором, определяющим канал проводимости при импульсной ЭТО, является наличие скин-слоя. Приблизительно можно записать, что эффективная величина скин-слоя как канала проводимости равна:

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{2\mu_r \mu_0 \sigma \omega}}, \quad (1)$$

где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость, См/м;  $\omega$  – циклическая частота тока, Гц.

Если  $\omega \sim 5 \cdot 10^3$  Гц, то для металлов  $\delta$  составит порядка  $10^{-3}$  м.

В скин-слое концентрируется объемная плотность энергии магнитного поля, которая для неферромагнитной среды имеет вид

$$P = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{BH}{2} = \mu\mu_0 \frac{H^2}{2}, \quad (2)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м.

По физической сути  $P$  есть магнитное давление, сжимающее проводник в импульсном режиме, и так как  $B = \mu\mu_0 I / 2\pi r$  (где  $I$  – величина тока,  $r$  – радиус проводника), то можно записать, что

$$P = \frac{1}{8} \mu\mu_0 \left( \frac{I}{\pi r} \right)^2 = \frac{1}{8} \mu\mu_0 r^2 j^2, \quad (3)$$

где  $j$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>.

Для алюминиевого расплава ( $\mu_r = 1$ ) можно записать

$$P = 0,16 \cdot 10^{-7} (I/r)^2. \quad (4)$$

Таким образом, для тока килоамперного диапазона и проводников радиусом от  $10^{-2}$  до  $10^{-1}$  м вправе ожидать величин магнитного давления до  $10^5$  Па.

Эффект термостатирования расплава, реализуемого с помощью скин-слоя джоулевым нагревом, можно оценить следующим образом. По закону Джоуля-Ленца за время импульса тока  $t$  выделится количество тепловой энергии

$$Q = \int_0^{T_{\text{и}}} I^2(t) \cdot R(t) dt, \quad (5)$$

где  $T_{\text{и}}$  – длительность импульса, с;  $R$  – сопротивление скин-слоя, Ом.

Следующим важным фактором, который может изменить температурный баланс в скин-слое, может выступить эффект Пельтье. В отличие от Джоулевой теплоты, пропорциональной квадрату силы тока и всегда выделяющейся в проводнике, теплота Пельтье пропорциональна первой степени силы тока, а ее знак зависит от направления тока в контакте двух проводников. В качестве таких проводников могут выступить металлические примеси в алюминиевой матрице, интерметаллиды и сама матрица. Известно, что если ток в контакте идет из проводника с большим значением коэффициента Пельтье в проводник с меньшим значением, то теплота Пельтье выделяется в слое, и наоборот. Явление Пельтье описано и хорошо изучено для случая постоянного тока. Если выдвинуть гипотезу о том, что эффект Пельтье является одним из факторов, изменяющих температуру расплава, то нужно учесть, что в случае знакопеременного тока можно ожидать и колебаний температуры Пельтье, способствующих растворению проводящих добавок.

Как было отмечено выше, при пропускании электрического тока происходит искажение каналов проводимости в локальных зонах. Физически это можно пояснить следующим образом. Проводимость как интегральная величина складывается из элементарных актов пробега носителей заряда – электронов. Масштаб длины этих элементарных актов определяется атомарным строением жидкого металла и составляет величину, равную межатомному расстоянию [41]. Таким образом, эта величина будет зависеть от включений на атомарном и мезоуровнях. Такие барьеры или дополнительные туннели проводимости изменяют в локальных зонах каналы проводимости. Вместе с тем должен реализовываться и обратный эффект – сила тока на элементарных каналах проводимости воздействует на их структуру, то есть изменяется функциональный параметр физических свойств материала. При этом интегральный процесс проводимости может практически не изменяться.

Поскольку в обрабатываемом кристаллизующемся расплаве каналы проводимости будут проходить в том числе и по твердой фазе, необходимо обратить внимание на экспериментальные данные, показывающие положительные моменты ЭТО металлов в твердом состоянии. Например, экспериментально установлены факты, свидетельствующие о залечивании дефектов строения кристаллов в металлических сплавах при обработке импульсным током как в области низких (от 100 до 450<sup>0</sup>C), так и высоких температур (от 750 до 820<sup>0</sup>C) [42–44]. В работе [44] отмечено, что это влияние проявляется в большей мере для более дефектной структуры. При этом происходят изменение модуля Юнга и увеличение предела прочности. Данные работ [45, 46] свидетельствуют о перестройке структуры и увеличении долговечности титановых сплавов под воздействием электроимпульсной обработки. Они аналогичны воздействию постоянного тока или вакуумного отжига. Данные работы [47] показывают, что даже слабые электромагнитные поля облегчают перенос атомов водорода и способствуют активации его проникновения в межкристаллитные, межфрагментарные и межблочные объемы металла.

#### **Технологические факторы электротокковой обработки материалов**

При проведении работ, направленных на создание или развитие любого метода обработки материалов, необходимо оценить состояние вопроса по реализации этого метода в технологическом оборудовании. Необходимость такого подхода определяется оценкой возможных технологических схем обработки, допустимых финансовых затрат, оценкой инновационной привлекательности метода. Проведенный нами анализ показал отсутствие опубликованных данных по оборудованию для ЭТО, несмотря на опытно-промышленную проверку метода. Фундаментальный подход к решению этой задачи сводится к первоначальному анализу места разрабатываемой технологии в системе существующих [48, 49].

В целом воздействие на жидкие и жидкокристаллические среды различных видов энергии можно классифицировать по аналогии с данными работ [50–51] следующим образом:

- а) формирующий эффект — проявляется в тех случаях, когда он является движущей силой процесса;
- б) интенсифицирующий эффект — проявляется в увеличении скорости процесса;
- в) оптимизирующий эффект — проявляется в упорядочении характера протекания процесса.

В то же время технологические процессы, реализуемые в объекте обработки, можно разделить по пяти классам — гидромеханические (в т.ч. акустические), тепловые, массообменные, механические и химические. Тогда эффект воздействия на объект обработки условно можно представить, как в табл. 1. А качественное соотношение эффективности воздействия можно условно представить данными табл. 2 на примере широко используемой акустической и электромагнитной обработок.

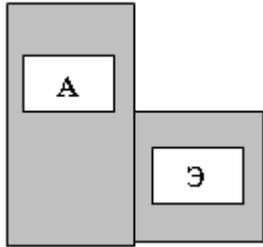
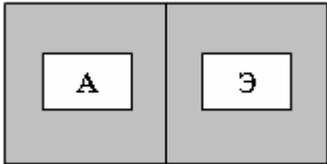
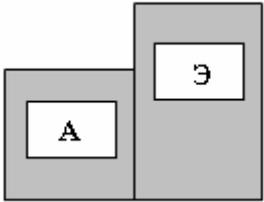
Конечная цель любого метода обработки жидкого и кристаллизующегося металла может быть сведена к двум взаимообусловленным задачам:

- а) обеспечить высокое качество литого металла;
- б) минимизировать стоимостные показатели.

Таблица 1. Эффекты воздействия и физические процессы, реализуемые физико-техническими методами обработки жидкого и кристаллизующегося металла

Процессы	Эффект воздействия		
	стимулирующий	интенсифицирующий	оптимизирующий
Гидромеханические	Перемешивание	Дегазация	Кристаллизация
	Кавитация	Кристаллизация	
	Диспергирование твердой фазы	Кавитация	
	Кристаллизация		
Тепловые (тепломас-сообменные)	Кристаллизация	Теплопередача	Теплопередача
	Теплопередача	Кристаллизация	Кристаллизация
Массообменные	Кристаллизация	Кристаллизация	Кристаллизация
	Кавитация	Кавитация	
Механические	Диспергирование твердой фазы	Прессование	Диспергирование
	Прессование	Дегазация	Перемешивание
	Перемешивание	Диспергирование	
Химические	Образование и деструкция химических соединений	Реакции в гетерогенных и многофазных системах	Реакции в гетерогенных и многофазных системах

Таблица 2. Качественное соотношение эффективности различных технологических процессов

Показатель	Тип процессов		
	Механические и гидромеханические	Тепло- и массообменные	Химические
Степень эффективности			

*Примечание. А, Э – акустическое, электромагнитное воздействие соответственно.*

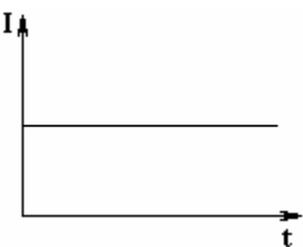
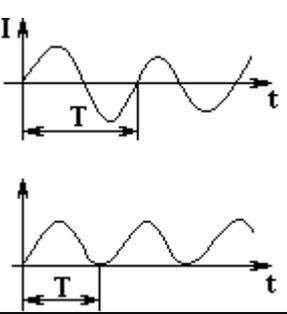
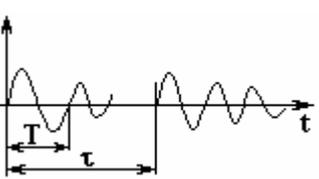
Но, как отмечалось в работе [52], любой из таких методов является многофункциональным, многоцелевым, но не универсальным. Поэтому при исследовании и разработке нового метода нужно показать его функциональные возможности с учетом достижения двух вышеуказанных основных задач.

Анализ литературных и патентных источников показал, что метод обработки жидкого и кристаллизующегося металла электрическим током обладает инновационной привлекательностью. Здесь минимизируются непроизводительные потери энергии, так как обработка ведется не опосредованно. Кроме того, выявлены функциональные возможности электрического тока по изменению структуры и свойств металла. При этом различный режим пропускания электрического тока (постоянный, периодический, импульсно-периодический) может приводить к различным эффектам в металле (табл. 3).

## Выводы

Влияние ЭТО на процессы в жидком и кристаллизующемся металле относится к категории многофакторной, многофункциональной и многоцелевой проблемы. Понимание природы этой проблемы требует детального рассмотрения как металлофизических аспектов воздействия, так и электрофизических, и электродинамических факторов с привлечением в том числе методов термодинамики, физики неупорядоченных систем, магнитной гидродинамики.

Таблица 3. Функциональные возможности электрического тока

Режим тока	Процессы в расплаве
<p>Постоянный ток</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Разогрев <math>Q \sim I^2</math></li> <li>2. Электроперенос <math>J \sim I</math></li> <li>3. Изменение кинематики включений <math>F \sim I^2</math></li> <li>4. Изменение термодинамических параметров на границе раздела фаз</li> <li>5. Тепловая конвекция</li> <li>6. Химические превращения (реакции)</li> </ol>
<p>Периодический ток</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. П. 1 – 6 (для постоянного тока)</li> <li>2. Колебания и пульсации</li> <li>3. Более эффективное использование потребляемой мощности с ростом <math>f</math></li> <li>4. Наличие скин-слоя при значительном <math>f</math></li> <li>5. Магнитное давление <math>P \sim I^2</math></li> </ol>
<p>Импульсно-периодический ток</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. П.1 – 6 (для постоянного тока)</li> <li>2. П.2 – 5 (для переменного тока)</li> <li>3. Пауза тока (скважность тока)</li> <li>4. Широкий спектр амплитудно-частотной характеристики тока</li> </ol>

Анализ литературных источников по научно-техническим аспектам ЭТО жидкого и кристаллизующегося металла показал, что этот метод имеет широкие функциональные возможности, которые могут обеспечить кардинальное улучшение структуры и свойств литого металла. В литературных источниках не найдено данных, показывающих не только сравнение результатов обработки по разным режимам тока, но и сравнение ЭТО с другими методами электрофизической обработки жидкого и кристаллизующегося металла прежде всего по показателям качества и энергозатратам.

Импульсно-периодическое токовое нагружение жидкого и кристаллизующегося металла имеет определенные преимущества перед режимами постоянного и переменного тока. Прежде всего – это более низкие энергозатраты при одновременном уменьшении потерь на нагрев металла. Но работы по изучению механизмов и поиску оптимальных схем такой обработки пока только начаты и находятся в стадии лабораторных исследований, а их результаты пока нельзя применить к реальным условиям литейного производства (большие массы расплава, существующие скорости охлаждения, технологическая оснастка и др.).

Необходимо отметить, что серьезным недостатком работ по ЭТО является отсутствие данных по описанию источников тока, что служит сдерживающим фактором для систематизации литературных данных. Кроме того, вне поля зрения исследователей остался вопрос о влиянии геометрии и расположения электродной системы как важнейшего технологического элемента в формировании электрического и магнитного полей в металле.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлович Ю.А. *Кристаллизация слитка в электромагнитном поле*. М.: Металлургия, 1986. 166 с.

2. Шкляр В.С. Влияние электрического тока на кристаллизацию металла. *Процессы литья*. 1995, (1), 15–19.
3. Шкляр В.С. Влияние электрофизической обработки расплава при непрерывной разливке на неметаллические включения. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1993, (1), 15–16.
4. Миненко Г.Н. Влияние электрического тока на качество поверхности стальных отливок. *Литейное производство*. 2002, (7), 17.
5. Миненко Г.Н., Сухарчук Ю.С., Гайтан Г.В. Повышение механических свойств отливок из серого чугуна обработкой электрическим током в процессе модифицирования. *Литейное производство*. 1979, (8), 5–6.
6. Миненко Г.Н., Подъячев А.П. Механические свойства литой стали при обработке расплава электрическим током. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1981, (7), 156–157.
7. Миненко Г.Н., Коган Б.Л., Петров Н.Н. Свойства серого чугуна, обработанного при модифицировании электрическим током. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1982, (9), 123–124.
8. Миненко Г.Н. Механизм обработки электротокотом Fe–C–расплавов. *Литейное производство*. 2002, (9), 7–8.
9. Миненко Г.Н. Обработка током жидкой стали. *Литейное производство*. 1997, (7), 17–18.
10. Миненко Г.Н. Механизм обработки металлического расплава электрическим током в процессе модифицирования. *Электронная обработка материалов*. 1990, (6), 42–44.
11. Дорофеев А.В., Килин А.Б., Тортишников А.С. Обработка алюминиевых расплавов электротокотом // *Литейщик России*. 2002. № 2. С.19–21.
12. Килин А.Б., Дорофеев А.В., Покровская Т.С. Электротокотовая обработка металлических расплавов. *Сб. науч. трудов ученых Орловской обл.* 1999, 1(5), 357.
13. Башмакова Н.В. *Исследование влияния электрического тока на кристаллизацию и свойства алюминиевых сплавов с повышенным содержанием железа*. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 02.16.04 "Литейное производство". Новокузнецк, 2007. 16 с.
14. Деев В.Б., Селянин И.Ф., Башмакова Н.В. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов, содержащих железо. *Литейщик России*. 2007, (8), 12–15.
15. Таран Ю.Н., Пригунова А.Г., Казимирова Е.Н. Влияние обработки расплава электрическим током на морфологию фаз в сложнолегированных силуминах. *Металлургия и коксохимия*. 1987, 92; 67–70.
16. Таран Ю.Н., Пригунова А.Г., Казимирова Е.Н. Модифицирование интерметаллидных фаз обработкой расплава электрическим током. *Доклады АН СССР*. 1986, (3), 668–670.
17. Бурдак А.П. и др. Особенности распределения электрических полей в проводящих средах при наличии скачка потенциала на границах раздела фаз. *Техническая электродинамика*. 1990, (1), 38–41.
18. Манохин А.И., Мальцев Г.Т. Снижение зонной ликвации в слитках стали У7 и 1Х18Н9Т электроимпульсной обработкой при затвердевании. *Сталь*. 1990, (9), 65–67.
19. Миненко Г.Н., Подъячев А.П. Механические свойства литой стали при обработке расплава электрическим пульсирующим током. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1981, (7), 22–26.
20. Миненко Г.Н., Сухарчук Ю.С., Гайтан Г.В. Повышение механических свойств отливок из серого чугуна обработкой пульсирующим электрическим током в процессе модифицирования. *Литейное производство*. 1979, (8), 5–6.
21. Зарембо В.И. и др. Изменение ликвации жаропрочных сплавов на основе никеля и кобальта при кристаллизации в слабых электромагнитных полях в токовом режиме. *Химическая промышленность*. 2003, 80(9), 31–37.
22. В.И. Зарембо и др. Влияние импульсов тока на процессы плавления и кристаллизации металлов. *Металлургия машиностроения*. 2003, (1), 11–15.
23. 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.
24. Кадомцев Б.Б. *Коллективные явления в плазме*. М.: Наука, 1975. 303 с.
25. Клименко А.П. и др. Резонансное воздействие электромагнитных полей на фазовые превращения в стали. *Теория и практика металлургии*. 2002, (3), 54–57.
26. Семькин С.И. Природа и механизм влияния электрической энергии малой мощности на процесс конвертирования железоуглеродистого расплава. *Металл и литье Украины*. 2005, (3–4), 47–57.
27. Семькин С.И. и др. Изучение динамики прогнозируемых физических характеристик конвертерных шлаков при выплавке металла по технологии с электрическим воздействием малой мощности. *Металл и литье Украины*. 2005, (3–4), 57–60.
28. Семькин С.И. и др. Исследование влияния электрической энергии малой мощности на эффективность внепечной обработки стали. *Металл и литье Украины*. 1995, (7–8), 17–22.

29. Семькин С.И. и др. Ресурсо- и энергосберегающая технология конвертерной плавки с электрическими воздействиями. *Металл и литье Украины*. 2004, (11), 46–48.
30. Семькин С.И. Опыт применения электрического воздействия при конвертерной плавке на комбинате «Криворожсталь». *Сталь*. 2004, (6), 37–44.
31. Вильский Г.Б., Фарнасов Г.А. Импульсное пондеромоторное воздействие на кристаллизующийся металл. *Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. "Электрический разряд в жидкости и его применение в технологии машиностроения и металлообработки"* (Николаев, сентябрь 1976). Киев: Наук. думка, 1976. С. 78–79.
32. Вернидуб А.Г. и др. Обработка сплава АК7 импульсным электрическим током. *Процессы литья*. 2005, (1), 12–14.
33. Fuchang Zhang, Ming Zhang, Bo Li, Jianhui Li. Effect of high energy-density pulse current on solidification. *Materials Science*. 2007, **13**(2), 120–123.
34. Xiliang Liao, Jun Luo, Wenjie Chen, Yongyong Gong. The refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum. *School of Materials Science and Engineering*. 2006, (4), 32–35.
35. Yongyong Gong. The effects of the electric current Pulse on the interface stability of Al-alloy. *School of Materials Science and Engineering*. 2006. № 10. P. 12–13.
36. 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.
37. Barnak J.P., Sprecher A.F., Conrad H. Colony Size reduction in eutectic Pb-Sn castings by electropulsing. *Scripta Metallurgica*. 1995, **32**(6), 879–884.
38. Manabu Usui, Shigeo Asai, Kasuhiko Iwai. Refinement of solidified structure using DC electromagnetic field. *ISIJ International*. 2008. Vol.48, №3. P. 330–333.
39. Tsutomu Takagi, Kazuhiko Iwai, Shigeo Asai. Solidified Structure of Al alloy by a local Imposition of an electromagnetic Oscillation Force. *ISIJ International*. 2003, **43**(6), 842–848.
40. Rongshan Qin. Solidification under electropulsing. *International Journal of Cast Metal Research*. 2007, **25**(7), 92–98.
41. Регель Р., Глазов В.М. *Закономерности формирования структуры электронных расплавов*. М.: Наука, 1982. 320 с.
42. Баранов Ю.В. Дефектообразование и закачивание дефектов в металлических материалах импульсным электрическим током. *Тяжелое машиностроение*. 2005, (1), 23–29.
43. Ветлинская С.В. К теории залечивания поры в металле под действием электрического тока. *ФММ*. 1976, **41**(2), 431–434.
44. Лоскутов С.В. и др. Об изменении структуры сплава ВТ3-1 при электроимпульсном воздействии. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2006, **28**(3), 345–353.
45. Бедюх А.Р. и др. Механизм ускорения диффузии при воздействии СВЧ тока на дислокационную структуру металла. *ФТТ*. 1989, **31**(3), 313–315.
46. Лоскутов С.В. Влияние электроимпульсной обработки на структуру и долговечность титановых сплавов. *ЖТФ*. 2002, **72**(4), 133–135.
47. Орлов П.С. Влияние электромагнитных полей на транспорт атомов водорода в стали. *Электронная обработка материалов*. 2007, **43**(1), 52–56.
48. Дубровська Г.М. *Системи сучасних технологій: навчальний посібник*. За ред. А.П. Ткаченка. Киев: Центр навчальної літератури, 2004. 352 с.
49. Старіш О.Г. *Системологія: підручник*. Київ: Центр навчальної літератури, 2005. 232 с.
50. *Ультразвук: малая энциклопедия*. Гл.ред. И.П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
51. Кардашев Г.А. *Физические методы интенсификации процессов химической технологии*. М.: Химия, 1990. 203 с.
52. Найдек В.Л. *Процессы внеагрегатной обработки металлических расплавов массового использования. Современное материаловедение XXI века*. Киев: Наук. думка, 1998. С. 133–164.

*Поступила 13.01.11  
После доработки 09.06.11*

### Summary

This paper features the overview of the results of treatment of fluid and crystallized alloys in casting technologies on basis of electric current.