

---

# ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ

УДК 621.74.02:52-46

**В. Н. Цуркин**

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА В ТЕХНОЛОГИЯХ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Изложены некоторые ключевые проблемные ситуации, которые нужно учитывать при постановке задач и трактовке экспериментальных данных при исследовании процессов кондукционной электротокковой обработки расплава.*

**Ключевые слова:** расплав, кондукционная электротокковая обработка, система структуры, кристаллизационная способность расплава, электрическое поле, параметры воздействия.

*Викладено деякі ключові проблемні ситуації, які потрібно враховувати при постановці задач і трактуванні експериментальних даних при дослідженні процесів кондукційної електрострумкової обробки розплаву.*

**Ключові слова:** розплав, кондукційна електрострумкова обробка, система структури, кристалізаційна здатність розплаву, електричне поле, параметри впливу.

*Some key problem situations which need to be taken into account at raising of tasks and interpretation of experimental data at reseach of processes of conduction electro-current treatment of fusion are expounded.*

**Keywords:** fusion, conduction electro-current treatment, system of structure, crystallization ability of fusion, electric field, parameters of influence.

### *Постановка задачи*

Электрический ток, генерируемый в расплаве с помощью энергетического источника, логично классифицировать как индукционный и кондукционный [1]. В первом случае ток наводится при обработке расплава магнитным полем, а во втором – при наложении на расплав электрического потенциала с помощью специальных электродов, введённых в расплав. Логика такого разделения поясняется как различными физическими аспектами воздействия, так и различными подходами к формализации процессов обработки. Активное использование в технологиях литейного производства индукционного принципа обработки основано на развитом аппарате магнитной гидродинамики проводящих сред. Рыночные же перспективы метода кондукционной электротокковой обработки (КЭТО) пока сдерживаются из-за недостатка научно обоснованных и подтверждённых данных, в первую очередь, о его функциональных возможностях. Хотя многочисленные опубликованные результаты КЭТО однозначно подтверждают, что он является экологически чистым, относительно дешёвым и простым в реализации инструментом, способным функ-

ционально обеспечивать высокие показатели структуры литого металла и его служебных свойств. Но уникальность – не индикатор рыночных перспектив.

Очевидным преимуществом метода КЭТО перед другими методами физико-технической обработки расплава (электромагнитное или механическое перемешивание, ультразвуковая или электрогидроимпульсная обработка и т. п.) является то, что пропускаемый через расплав электрический ток, в силу своей физической природы, обеспечивается элементарными актами переноса заряда непосредственно на атомарном уровне, на котором также реализуются элементарные акты диффузии, теплопроводности, вязкости, сорбции и т. д. Причём характерные времена этих элементарных актов на несколько порядков превышают времена элементарных актов проводимости [2]. Кроме того, тепловой эффект тока приводит к изменению температурных показателей металлической системы на разных уровнях её структуры. Но функциональные возможности КЭТО многовариантны [1-5], а их коллективное взаимосогласованное воздействие на объект обработки, скорее всего, не подчиняется принципу аддитивности, так как расплав является существенно нелинейной системой в силу того, что его свойства зависят от происходящих в нём процессов. Очевидно, это одна из причин того, что полученные и опубликованные на сегодня экспериментальные данные по результатам КЭТО расплавов, а также предлагаемые объяснения некоторых её возможных механизмов, в некоторой мере, противоречивы. Это обстоятельство, конечно же, не позволяет сформулировать в первом приближении как логично обоснованные закономерности процессов при КЭТО, так и зависимости результата обработки, определяемого его целью, от технологических параметров источника тока. Такой вывод можно сделать после проблемно ориентированного анализа публикаций, изложенных как в обзоре [5], так и в более поздних публикациях, в том числе англоязычных. Здесь следует отметить, что в последнее время количество публикаций по КЭТО расплава растёт, хотя, как и ранее, постановка задач этих исследований слишком упрощена, а поставленные цели предполагали получить отсутствующие сведения на основе фрагментарного изучения эффектов КЭТО.

В связи с этим в данной работе поставлена цель – проанализировать комплекс факторов, которые нужно учитывать при постановке задач исследований процессов КЭТО, и влияние параметров воздействия на прогнозирование эффекта обработки.

### *Анализ проблемных ситуаций*

Используемые в технологиях литейного производства методы и средства контроля и управления качеством отличаются не только методологией выбора, но и их конечной результативностью. Ранее в работах [3, 6] были показаны преимущества системного подхода к решению проблем повышения качества литой металлопродукции, которые основаны, прежде всего, на комплексном учёте многообразных ключевых факторов, активно влияющих на показатели качества литой металлопродукции. В этом плане основная первоначальная проблема системного подхода заключается в рассмотрении и описании её объектов как совокупности взаимодействующих элементов системы, направленных на выявление и изучение типов связей между ними. Тогда структура системы понимается как проявление процессов через сеть взаимосвязей.

В развитие положений работы [3] рассмотрим некоторые аспекты обобщённой системы признаков метода кондукционной электротокковой обработки, ограничившись анализом физических принципов воздействия и свойств объекта обработки в разных температурных интервалах расплава.

Прежде всего необходимо отметить, что параметры воздействия (ПВ) априори можно подразделить на технологические параметры обработки (ТПО), задаваемые генератором тока, и внешние структуроформирующие параметры (ВСФП), обеспечивающие уже термосиловое воздействие на расплав, соответствующее

функциональным возможностям тока и приводящее к внутренним структурно-кинетическим и фазовым изменениям (ВСКФИ) объекта обработки [3]. Таким образом можно определить сеть взаимосвязей в системе ТПО-ВСФП-ВСКФИ. Многообразие характеристик и параметров ВСФП в расплаве определяется не только его структурой и свойствами, но и ТПО, которые не ограничиваются задаваемыми значениями тока и напряжения на выходе генератора, а учитывают и режим тока (постоянный, переменный, пульсирующий, импульсный) [5]. И если значения тока и напряжения источника определяют амплитудные значения термосилового воздействия на объект обработки, то режим тока в совокупности с принципом расположения электродов определяет конфигурацию каналов проводимости. Здесь необходимо сделать следующие замечания.

Для любого объекта физико-технической обработки реализуемые ТПО параметры ВСФП должны обеспечить или перестройку сложной структуры металлической системы [7], или управление процессами в структуре системы, либо же их регулирование [8-10]. Причём в первом случае плотность энергии воздействия должна быть соизмерима с энергией связи элементов системы. Во втором и третьем случаях достаточно малых плотностей энергии, локально влияющих лишь на некоторые связи элементов структуры. Таким образом основная проблема внешнего воздействия на расплав с определёнными значениями ТПО заключается в создании достаточной интенсивности воздействия. Например, в работе [11] методами термодинамики определены затраты энергии внешнего воздействия на процессы кристаллизации, которые рассмотрены с точки зрения влияния объёмной плотности энергии внешнего воздействия  $E_{\text{вн}}$  на изменение свободной энергии, соответствующее образованию зародыша в равном ему объёме расплава. Так, для алюминия в случае гомогенной кристаллизации  $E_{\text{вн}} \approx 8,5 \text{ МДж/м}^3$ , а в случае гетерогенной – на зародыше с развитой поверхностью  $E_{\text{вн}} \approx 0,3 \text{ МДж/м}^3$ . Такие плотности энергии в локальных микроразделах расплава соответствуют давлениям такого же мегаджоульного диапазона, то есть порядка  $10^6$ - $10^7$  Па, что можно обеспечить только при импульсном режиме тока [5]. Управление или регулирование процессами в расплаве могут реализовываться или при малых уровнях энергии короткодействующих синхронных флуктуаций энергии связи атомов [12], или же в режимах возможных резонансных процессов, для которых основную роль играет частота возмущающей нагрузки, а не её амплитуда [8, 9, 13]. Очевидно, что этим можно объяснить ключевую роль частоты пульсаций тока, а не его амплитуды в модифицировании силумина при его жидкофазной обработке (например, см. [14]). То есть необоснованное перенапряжение расплава может привести к его неконтролируемой и неблагоприятной реакции.

Авторы многих публикаций в качестве ВСФП при КЭТО приводят или значение силы тока или его плотности в объекте обработки. Но кондукционный (впрочем, как и индукционный) ток возникает в результате формирования в расплаве электрического или (и) магнитного поля. То есть первичной сферой влияния на расплав является поле, характеристики которого определяются значениями ТПО, типом электродной системы, режимом тока, который генерируется источником, проводимостью объекта обработки и его конфигурацией. Таким образом, логично определить в задачах моделирования в качестве ВСФП при КЭТО напряжённость поля, его индукцию, проводимость среды и её магнитную проницаемость. Эти характеристики определяются законами макроскопической электродинамики. Но объект обработки, как отмечалось выше, является неоднородной гетерогенной системой. Различного рода неметаллические включения и специально вводимые добавки, образующиеся и растущие кристаллы из-за разницы проводимости с матрицей искажают конфигурацию поля макроуровня на микро- и мезоуровнях, что в свою очередь может вызывать и соответствующую реакцию таких включений микроскачком потенциала, так как здесь электрический ток и электрическое поле в области включений ориен-

тированы в направлении противоположном внешнему электрическому полю [15]. Такой эффект оказывает ключевое воздействие на элементарные акты процессов ВСКФИ в расплаве за счёт изменения энергетической активности включений.

Генерируемое в расплаве поле является одновременно источником возмущений и потребителем электрической энергии, органически связывающим ТПО и ВСФП, формирующие это поле. Это позволяет наметить два пути диагностики воздействия при КЭТО – по мощности источника и по выделенным ключевым параметрам энергетического воздействия на расплав.

Реакцией объекта обработки на сформированное поле является кондукционный ток, действие которого на расплав не ограничивается только джоулевым нагревом. При взаимодействии нестационарного поля с расплавом, например, могут возникать также различного рода эффекты, обусловленные (в терминологии работ [8, 9]) электро-магнито-акустическими преобразованиями энергии поля. Это в свою очередь вызывает в расплаве гидродинамические процессы, в том числе и акустические.

Понимание и определение эффектов, лежащих в основе ВСКФИ в расплаве, не возможно без описания структуры и свойств расплава в различных температурных интервалах состояния.

Эти состояния расплава можно разбить на три группы:

- предкристаллизационная зона, в которой формируется кристаллизационная способность расплава;
- кристаллизационная зона, в которой формируются центры кристаллизации, отдельные первичные кристаллы и кристаллические зоны;
- зона затвердевания, которая соответствует окончанию процесса перехода из жидкого в твёрдое состояние.

Результаты различных исследований по структуре и свойствам литого состояния показывают положительный результат обработки как в отдельно взятых зонах, так и на протяжении всего процесса перехода из жидкого в твёрдое. Вместе с тем на сегодня однозначного ответа на вопрос о рациональном выборе значений ТПО и ВСФП для различных температурных интервалов КЭТО нет. По-видимому, одной из причин этого обстоятельства является фрагментарное (выборочное априори) описание структуры, свойств и состояния объекта обработки.

Современные модельные представления жидкометаллических систем опираются на их микронеоднородное строение, характеризующее, прежде всего, энергетической неравноценностью связей. Размер же группировок в силу их динамичности не играет решающей роли в формировании свойств [16]. При этом следует рассматривать структурную, химическую и электронную микронеоднородность и здесь ждут своего решения, как минимум, три проблемы, которые влияют на механизмы отклика объекта обработки на внешнее воздействие поля в принципе любой физической природы [17, 18]. А именно:

– Какими характеристиками межатомного взаимодействия определять степени микронеоднородностей? Решение этой проблемы усугубляется и тем, что задача определения энергии связи между частицами не решена даже в идеальном случае, поэтому постулируют существование простых взаимодействий между атомами [12, 16, 19].

– Как от информации о микронеоднородности структуры перейти к объяснению закономерностей свойств?

– Какими физико-химическими критериями (интегральными или парциальными) следует пользоваться при описании закономерностей формирования свойств расплавов? Методика выбора и определения таких критериев предложена в [17] на основе использования аппарата теории направленной химической связи.

Принимая для моделирования микронеоднородное строение расплава, нужно учитывать, что такая структура является зыбкой, пульсирующей, соответствующим

образом влияющая на каналы проводимости [12, 16]. Но кластеры, по сравнению со случайными флуктуациями, имеют более длительный период существования и гораздо больше общего с понятиями ассоциации и сольватации, при этом кластеры заряжены положительно, а разупорядоченные зоны – отрицательно [16, 18]. Здесь логично предположить общую электронейтральность макрообъёма расплава по аналогии с плазмой. Исследуя методами рентгеноструктурного анализа и высокоразрешающей сканирующей туннельной микроскопии особенности атомного строения жидкого состояния металлических материалов, авторы работы [20] показали, что в межкластерном пространстве атомные скопления не влияют на формирование дифракционной картины, а только на уровень интенсивности рассеяния. Это возможно только в том случае, когда все расстояния между атомами равновероятны, что характерно только для газа. В то же время основной структурной единицей являются образования с относительно упорядоченной структурой, обременённой как ближним, так и дальним взаимодействием. По данным работы [21] относительная концентрация активированных атомов, составляющих разупорядоченную зону в ряде металлов, составляет величину от  $\approx 20$  до 40 % при перегревах над температурой плавления до 400 К. Безусловно, что такое соотношение упорядоченных и разупорядоченных зон в структуре расплава также формирует определённые каналы проводимости. Если нет (а его не может быть по определению в надликвидусной температурной зоне) единого каркаса из кристаллоподобных образований, то, условно, объём расплава можно смоделировать в виде последовательно соединённых сопротивлений с разной (отличающейся в разы) проводимостью. Таким образом при одинаковом значении величины тока будет реализовываться в первую очередь по-разному и джоулев нагрев этих сопротивлений. Можно предположить, что при этом в микрогруппировках возникают локальные градиенты температур, потенциально могущие изменять термодинамические барьеры для процессов ситуации *in situ*, как замечено в работе [12]. Это в свою очередь приведёт к изменению процессов переноса, растворимости, сорбции и т. п., а в конечном итоге – к изменению величины свободной энергии жидкометаллической системы в локальных зонах расплава. В этом плане логично построенные рассуждения в работе [19] показывают роль цепочки процессов внутриатомного и межатомного взаимодействия в формировании зародыша кристаллизации. Роль электрического поля здесь может быть изучена с помощью анализа изменения химических потенциалов элементов системы – движущей силы процессов перестройки её структуры. В случае наличия электрического поля, как известно, значение химического потенциала изменяется на величину  $Z \cdot F \cdot \varphi$ , где  $Z$  – заряд частицы с учётом знака;  $F$  – постоянная Фарадея ( $F = N_A \cdot e$ , где  $N_A$  – число Авогадро,  $e$  – заряд электрона);  $\varphi$  – электрический потенциал.

С другой стороны, проводя аналогию с электронейтральной плазмой [22], приращение теплосодержания системы (энтальпии) в функции времени можно представить в виде:

$$\Delta H(t) = \int_0^t I(t) \cdot U(t) dt = \int_0^t N(t) dt,$$

где  $I$ ,  $U$  – соответственно величины тока и напряжения;  $N$  – мощность.

В случае генерирования в расплаве переменного, пульсирующего или, тем более, импульсного режима тока, имеющих широкий спектр амплитудно-частотной характеристики тока [24], в расплаве в соответствии с данным уравнением реализуются неоднородно распределённые пульсации энтальпии. Такой эффект в объёме расплава функционально, при достаточной степени интенсивности воздействия, должен изменять его кристаллизационную способность за счёт усиления флуктуаций.

Таким образом очевидные физические предпосылки показывают позитивные



функциональные возможности КЭТО в подготовке структуры расплава к эффективному кристаллообразованию во всём его объёме на последующей стадии кристаллизации. При этом такая обработка в надликвидусной зоне может проводиться при перегревах меньших, чем при термовременной обработке, которая проводится с длительной выдержкой и при существенных перегревах [23], когда происходит активное разупорядочивание структуры расплава. И если при термонагреве в расплаве увеличивается внутренняя энергия системы, то действие тока сопровождается ещё и дополнительной величиной работы над системой.

В температурном интервале кристаллизации уже с подготовленной структурой расплава в ситуации *in vitro* с помощью КЭТО основные процессы, очевидно, также можно представить на основе изложенных выше положений. Здесь также нагрузку для электрического поля можно представить совокупностью последовательно соединённых сопротивлений, но уже с другими значениями проводимости. Кроме того такая система является существенно менее «зыбкой», хотя более динамичной из-за активного роста числа центров кристаллизации и последующего роста кристаллов и кристаллических зон.

При переходе из жидко-твёрдого состояния в твёрдо-жидкое образуется каркас твёрдой фазы. В этом случае нагрузку (сопротивление) объекта обработки уже можно обозначить параллельным соединением проводников, для которого ток в цепи, определяемый на выходе генератора, будет делиться в соотношении сопротивлений. При этом будут реализовываться свои электрофизические и электродинамические процессы, приводящие термодинамические процессы *in situ* в гетерофазной системе в ситуацию *in vitro*.

В дополнение к изложенному заметим, что хорошо известное влияние физико-технической обработки на формирование мелкой фракции зёрен в литом металле в некоторых работах поясняется активизацией зародышеобразования. Другая же трактовка поясняет процесс измельчения зерна за счёт расщепления первичных кристаллов, обеспечивая искусственный источник зародышей. Последние представления почему-то превалируют. Но с точки зрения энергозатрат более рационально воздействовать на жидкое состояние малыми дозами энергии, когда активным структурообразующим фактором является проявление эффекта усиления флуктуаций за счёт появления избыточной свободной энергии. Кристаллы же обладают большим термодинамическим барьером для внешнего воздействия за счёт поверхностной энергии и наличия ближнего и дальнего взаимодействия. То есть диспергирование кристаллов требует генерирования в объекте обработки при КЭТО более высоких плотностей энергии, чем нужно для усиления флуктуаций при обработке жидкого состояния.

### Выводы

- Представленные в статье положения (скорее в порядке обсуждения) показывают определённую возможную перспективу адекватной постановки многопараметрических задач исследования влияния различных режимов и способов реализации КЭТО на структуру и свойства расплава для обеспечения высоких показателей качества литого металла. Эти положения не являются рекомендациями, а тем более указаниями. В соответствии с целью работы они изложены для того, чтобы в первом приближении описать ряд важных, по мнению автора, особенностей КЭТО, которые позволят при постановке и выборе метода решения соответствующих задач постулировать более простые взаимодействия в сложной нелинейной системе ТПО-ВСФП-ВСКФИ, или же выдвигать адекватные подходы к истолкованию опытных данных.

- Наличие электрического потенциала в расплаве при КЭТО вносит существенную корректировку в его термодинамическое состояние, в первую очередь, в локальных зонах, тем самым изменяя ход процессов «пакования» структуры твёрдого состояния. Но эффективность КЭТО, прежде всего, зависит от организации необходимой

и достаточной интенсивности воздействия для разных температурных интервалов. Технологические способы такой организации определяются параметрами генератора тока, типом электродной системы, конфигурацией и проводимостью объекта обработки, совокупность которых определяет характеристики и параметры сферы влияния на объект обработки – электрическое поле.

• Сложность, многофакторность и нелинейность процессов в расплаве при КЭТО не умаляют значения физического моделирования, для которого нужно минимизировать количество варьируемых параметров с более точным набором постоянных. В этом случае адекватная оценка возможных сценариев процессов, реализуемых в расплаве, так или иначе должна быть основана на знании (хотя бы на уровне феноменологических понятий) наиболее полного набора функциональных возможностей КЭТО и реакции на него расплава. То есть в соответствии с положениями теоремы К. Геделя « Полное и непротиворечивое описание какой-либо упрощённой системы возможно только с помощью более сложной системы», которую структурировать, описать и формализовать для КЭТО расплава ещё предстоит.



### Список литературы

1. Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в проводящих средах / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К.: Изд. Ин-та электродинамики НАН Украины, 1999. – 363 с.
2. Влияние системы структуры металлического расплава на его физические свойства / В. Н. Цуркин // Вісник Українського матеріалознавчого товариства. – 2011. – № 4. – С. 11-19.
3. Принципы системного подхода к выбору методов внепечной обработки расплава / В. Н. Цуркин // Металл и литьё Украины. – 2009. – № 7-8. – С. 12-16.
4. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г. А. Кардашев. – М.: Химия, 1990. – 203 с.
5. Электродная обработка жидких и кристаллизующихся сплавов в литейных технологиях / А. В. Иванов, А. В. Синчук, В. Н. Цуркин // Электронная обработка материалов. – 2011. – № 17(5). – С. 89-98.
6. Концепции управления качеством литого металла / В. Н. Цуркин // Металл и литьё Украины. – 2008. – № 9. – С. 25-28.
7. Иерархия структур и механические свойства литой стали // Литейное производство. – Б. Б. Гуляев, В. И. Пряхин, В. М. Колокольцев. – 1986. – № 10. – С. 9-12.
8. Зарембо В. И. Влияние импульсного тока на процессы плавления и кристаллизации металлов // Металлургия машиностроения. – В. И. Зарембо, О. Л. Киселёва, А. А. Клесников, и др. – 2005. – № 1. – С. 11-15.
9. Зарембо В. И. Структурирование неорганических материалов под действием слабых электромагнитных полей радиочастотного диапазона / В. И. Зарембо, О. Л. Киселёва, А. А. Клесников // Неорганические материалы. – 2004. – Т. 40. – № 1. – С. 86-94.
10. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем: Пер. с англ./ Под. общ. ред. И.Ф. Шахнова. – М.: Мир, 1973. – 380 с.
11. Балакин Ю. А. О взаимосвязи расхода энергии внешнего воздействия и структуры затвердевающего металла / Ю. А. Балакин, М. М. Гладков // Металлы. – 2001. – № 3. – С. 20-25.
12. Семёнов В. И., Монахов И. А. Самопроизвольные процессы и строение расплава вблизи равновесной температуры кристаллизации. – В. И. Семёнов, И. А. Монахов // Металлургия машиностроения. – 2005. – № 2. – С. 26-30.
13. Цуркин В. Н. К вопросу о резонансных процессах при обработке расплава в технологиях литейного производства // Процессы литья. – 2012. – № 6 (96). – С. 30-35.
14. Петров С. С. Структурные и фазовые превращения в силуминах под воздействием жидкофазной обработки электрическим током. – С. С. Петров, С. В. Пригунов, А. Г. Пригунова, Д. Н. Ключник // Металлофизика и новейшие технологии. – 2009. – Т. 31. – № 8. – С. 1161-1168.
15. Бурдак А. П. Особенности распределения электрических полей в проводящих средах

- при наличии скачка потенциала на границе раздела фаз. – А. П. Бурдак, Т. Н. Колосок, А. А. Кузнецова // Техническая электродинамика. – 1990. – № 1. – С. 38-41.
16. Металлические жидкости – проблемы и гипотезы. / Б. А. Баумю – М.: Наука, 1979. – 119 с.
17. Металлохимия многокомпонентных систем / Э. В. Приходько – М.: Металлургия, 1995. – 160 с.
18. Приходько Э. В. Физико-химические критерии для оценки степени микронеоднородности металлических расплавов. – Э. В. Приходько, А. Ф. Петров // Металлофизика и новейшие технологии. – 1998. – Т. 20. – № 7. – С. 64-74.
19. Семёнов В. И. Трудности кинетической теории кристаллизации металлов и сплавов // Металлургия машиностроения. – 2005. – № 1. – С. 16-21.
20. Ильинский А. Г. Особенности атомного строения металлических материалов в жидком и аморфном состояниях // Металлофизика и новейшие технологии. – А. Г. Ильинский, В. Л. Карбовский, А. П. Шпак, Ю. В. Лепеева. – 2010. – Т. 8. – №3. – С. 483-502.
21. Ершов Г. С. Структурообразование и формирование свойств сталей и сплавов. – К.: Наук. думка./ Г. С. Ершов, Л. А. Позняк. –1993. – 380 с.
22. Дихтер И. Я. Уравнение состояния и проводимость цезиевой плазмы при давлении 50-500 атм / И. Я. Дихтер, В. Л. Зейгарник // ДАН СССР. – 1976. – Т. 226. - № 3. – С. 656-657.
23. Piatkowski I., Gajdzik B., Matula T. Crystallization and structure of cast A390 alloy with melt over heating temperature // Metalurgiya 51. – 2012. - № 3. – P. 321-324.
24. Цуркин В. Н. Анализ характера протекания импульсного тока в массивном цилиндрическом проводнике при электротокерической обработке расплава / В. Н. Цуркин, А. В. Мельник, А. В. Иванов // Электронная обработка материалов. – 2011. – № 1. – С. 66-70.

Поступила 06.04.2015

### **Вниманию авторов!**

*Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объём статьи – не более **10 стр.**, рисунков – не более **5**.*

*Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.*

*Статьи в редакции проходят научное рецензирование.*