

Сравнительный анализ функциональных возможностей методов импульсной обработки расплава

В. Н. Цуркин, А. В. Иванов, С. С. Череповский, Н. А. Васянович

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: dpta@ipt.com.ua*

Рассмотрены общие признаки функциональных возможностей методов электрогидроимпульсной, импульсной электротокковой и магнитоимпульсной обработок расплава позитивно изменять его кристаллизационную способность.

Ключевые слова: расплав, импульсная обработка, кристаллизационная способность, энергетические факторы.

УДК 621.74.02:621.3.014.33

ВВЕДЕНИЕ

Переход металлической системы из жидкого состояния в твердое сопровождается двумя последовательными стадиями: кристаллизацией и твердением. На первой стадии по механизмам гомогенной и гетерогенной кристаллизации образуются так называемые отдельные первичные кристаллы и кристаллизующиеся зоны. На второй стадии происходит активный рост кристаллов, увеличивающий количество твердой зоны [1, 2]. При этом кристаллизационная способность расплава в значительной степени определяет структуру и свойства твердого состояния, а значит, и уровень качества литых изделий. По технологиям литейного производства за многие десятилетия накоплен огромный эмпирический материал о переходе жидкой металлической системы в твердое состояние в естественных условиях без искусственного изменения хода процессов кристаллизации и твердения, а также с учетом внешних воздействий на расплав, направленных на улучшение его кристаллизационной способности [3–5]. Заметим, что любое внешнее воздействие, кроме этой задачи, решает еще и проблемы удаления неметаллических включений, дегазации и гомогенизации сплава в макрообъеме, а также является основным методом получения из жидкого состояния новых материалов, таких как металлокерамика, наноматериалы, материалы с недендритной структурой и т.п. [6].

Методы внешнего воздействия основаны на разных физических принципах нагружения расплава, среди которых можно выделить импульсные. Но, как показал анализ публикаций и патентной информации по проблемам импульсной обработки расплава (ИОР), в технологиях литейного производства эти исследования находятся только на начальном этапе. Дальнейшее развитие ИОР можно увязать с их потенциальной способностью непосредственно влиять на ато-

марную структуру расплава, на уровне которой и происходят элементарные акты активационных процессов зарождения центров кристаллизации [7, 8]. Поэтому актуальной является задача, цель которой может быть сформулирована следующим образом:

определение общих и индивидуальных признаков методов импульсной обработки расплава применительно к их функциональной возможности изменять кристаллизационную способность расплава.

Такие признаки в первую очередь позволят в дальнейших исследованиях прагматично подойти к постановке задач, направленных на развитие научных представлений о физических принципах и технологических методах ИОР.

ОПИСАНИЕ ОБЩИХ ПРИЗНАКОВ МЕТОДОВ ИОР

Введем дефиницию понятий. Анализируемый в данной работе принцип ИОР осуществляется генерированием в объекте обработки одиночных конечных возмущающих импульсов, которые могут повторяться с определенной частотой следования f . При этом между импульсами, как правило, должна быть пауза, временной интервал которой, а также частота f и длительность импульса являются важными параметрами ИОР. Длительность импульса, как принято в технических приложениях, определяется величинами нано-, микро- или миллисекундного диапазонов [9–12]. Амплитудно-временная характеристика нагружающего импульса может быть как моно-, так и биполярной, а его спектр является поличастотным [11, 12]. За счет кратковременной длительности импульса вводимая в объект обработки мощность возмущения лежит в пределах мега- или гигаваттного диапазонов. Хотя с каждым импульсом в объект обработки передается энергия, ограниченная диапазоном от 10 до 10^4 Дж.

Заметим, что характер нагружения, схожий с импульсным, но без паузы нагрузки, логичнее классифицировать как пульсирующий.

При выборе метода внешнего воздействия нужно учесть характеристики и параметры объекта обработки и ее цель [7].

Объектом обработки в рассматриваемом нами случае является металлический расплав – сложная по строению гетерогенная система, описания которой основаны на результатах экспериментальных исследований, рассматривающая естественное состояние расплава с учетом его микронеоднородности, обозначаемой как кластерная система. Ее полное описание должно учитывать структурную, химическую и электронную микронеоднородность [13, 14]. Но все еще нерешенной остается проблема выбора и описания критериев, объединяющих эти три понятия и лежащих в основе закономерностей формирования свойств расплава, в том числе и в условиях ИОР.

Обработку расплава можно проводить в широком температурном интервале его значений в надликвидусной зоне вплоть до окончания процесса формирования эвтектики. Многие авторы склонны придерживаться гипотезы, поясняющей дополнительное формирование центров кристаллизации за счет дробления кластеров в понимании их структурной неоднородности. При этом необходимо отметить, что измельчение образованных в расплаве кристаллов за счет внешнего воздействия является более энергозатратным процессом, чем измельчение кластеров жидкости. Это объясняется тем, что твердое состояние имеет более устойчивую структуру, которая обладает наличием как дальнего, так и ближнего порядка. Для его разрушения требуется больший уровень энергии внешнего воздействия, которая растрачивается на деформирование до разрушения и преодоление поверхностной энергии. Поэтому энергетические параметры внешнего нагружения должны характеризоваться достаточным для дробления или кластеров, или кристаллов уровнем плотности энергии, сопоставимым с энергией связи атомов в жидком состоянии или с пределом прочности кристалла. Длительность сохранения эффектов перестройки структуры обеспечивается относительной устойчивостью новых сформированных химических связей [15].

ОПИСАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ МЕТОДОВ ИОР

Рассмотрим три принципа ИОР: электрогидроимпульсная (ЭГИО), импульсная электротоквая (ИЭО) и магнитоимпульсная (МИО). Одним из общих признаков является то, что возмущение

в объекте обработки генерируется непосредственно или опосредованно электрическим разрядом, источником которого является генератор импульсных токов (ГИТ). Его потребляемая мощность (важнейший показатель эксплуатационных расходов на обработку) в большинстве технологических приложений находится в пределах от единиц до десятков киловатт [16].

Физические принципы ЭГИО расплава и ее технологические аспекты подробно изложены в работе [17]. Воздействие на расплав повторяющимися с частотой f импульсами осуществляется погружаемым в расплав торцом волновода, механические импульсы перемещения реализуются с помощью электрических разрядов в специальном устройстве, рабочим органом которого является волновод. ИЭО расплава стала развиваться в последние годы [11, 12, 18, 19]. Нагружение расплава этим методом осуществляется прямыми разрядами тока в расплаве между погружаемыми электродами. МИО расплава через его зеркало в литейных технологиях стала использоваться благодаря успешному применению в технологиях штамповки. Пионерные работы в этом направлении обоснованно показали перспективы развития этого метода (см., например, [20, 21]). Так же как и в МИО, при штамповке возмущение в объекте обработки генерируется разрядом на индуктор с помощью ГИТ. Отметим, что параметры разряда ГИТ определяют амплитудные значения тока, а геометрия волновода при ЭГИО, тип и расположение электродной системы при ИЭО и индуктора при МИО влияют на конфигурацию генерируемых в объекте обработки полей концентрированных энергетических потоков, от характеристик которых в значительной мере зависит конечный эффект обработки.

На рисунке представлены схемы нагружения расплава анализируемыми методами. Общим здесь является то, что возмущение в расплав (от торца волновода, от электродов, от индуктора) передается непосредственно только в локальные зоны. При этом необходимо ввести понятия области первоначального воздействия, объем которой составляет величину $V_{нс}$, и области обрабатываемого объема, величина которого $V_{об}$ равна объему расплава. При ЭГИО энергия электрического разряда преобразуется в акустическую энергию и энергию гидродинамических течений. Первоначальные возмущения сосредоточиваются в объеме $V_{нс}$, имеющем в идеализированном представлении форму усеченного конуса с углом образующей порядка 60° [15, 17]. Меньшее основание конуса практически равно диаметру торца волновода ($2r$), а высота конуса может быть оценена величиной $\approx 4r$. Возникаю-

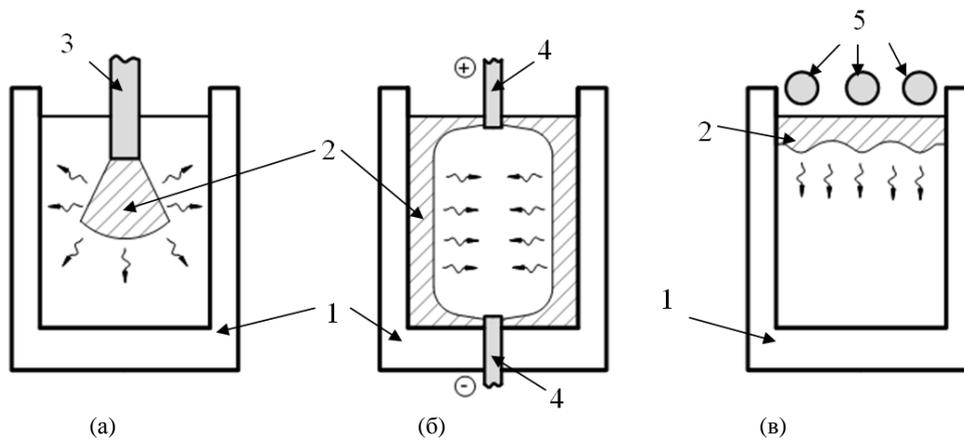


Схема нагружения расплава при ЭГИО (а), ИЭО (б) и МИО (в):

1 – емкость с расплавом; 2 – область прямого воздействия; 3 – волновод; 4 – электроды; 5 – индуктор.

щие при этом течения переносят возмущенную зону в объем $V_{об}$ со скоростью порядка 0,2 м/с.

При МИО и ИЭО область первоначального воздействия определяется скин-эффектом, при котором переменный ток вытесняется на поверхность проводника. Толщина скин-слоя зависит от проводимости расплава и частотной характеристики тока. В случае МИО и ИЭО можно в реальных пределах параметров разряда для оценок принять толщину скин-слоя порядка 1–2 мм. Возникающие при этом гидродинамические течения распространяются со скоростью порядка единиц мм/с [21, 22].

Таким образом, при всех трех рассматриваемых вариантах обработки реализуется возможность перемешивания объема $V_{не}$ с объемом $V_{об}$. Учитывая то, что $V_{не} < V_{об}$, ИОР следует проводить с частотой следования импульсов f , при этом рациональное время обработки $\tau = n/f$, где n – число импульсов. В работе [15] предложена простая процедура оценки предельного значения величины n , в соответствии с которой концентрацию обработанного металла C_n можно определить по формуле:

$$C_n = 1 - (1 - C)^n, \quad (1)$$

где $C = V_{не}/V_{об}$ – концентрация обработанного металла при первом импульсе.

Оценку значения n при $C_n = 1$ для ЭГИО, ИЭО и МИО расплава сделаем при следующих условиях. На практике в случае высоковольтных параметров ГИТ значение f используют в пределах от 1 до 10 Гц [12, 18, 21]. Диаметр волновода ($2r$) выбирают с учетом массы обрабатываемого металла, которая для Al сплавов, как правило, лежит в пределах от 1 до 10^3 кг, что соответствует величинам $V_{об}$ от $4,2 \cdot 10^{-4}$ до $4,2 \cdot 10^{-1}$ м³. В этом случае $2r$ выбирают соответственно в пределах от 20 до 30 мм.

В табл. 1 представлены значения n при $f = 1$ Гц для ЭГИО, в табл. 2 – для ИЭО, а

в табл. 3 – для МИО. Здесь для трех вариантов соотношений $2r$ и $V_{об}$ значения n не рассчитаны, так как они на практике не используются.

Таблица 1. Предельные значения количества импульсов при ЭГИО, обеспечивающие полное перемешивание расплава

$V_{об}, \text{м}^3$ \ $V_{не}, 10^{-4} \text{м}^3$	0,48	3,8	12,8
$4,2 \cdot 10^{-4}$	9		
$4,2 \cdot 10^{-3}$	100	10	
$4,2 \cdot 10^{-2}$	330	110	33
$4,2 \cdot 10^1$	1000	1100	330

Таблица 2. Предельные значения количества импульсов при ИЭО, обеспечивающие полное перемешивание расплава

$V_{не}/V_{об}$	0,06	0,03	0,015	0,007
n	16	33	67	145

Таблица 3. Предельные значения количества импульсов при МИО, обеспечивающие полное перемешивание расплава

$V_{не}/V_{об}$	0,015	0,0075	0,00375	0,00175
n	66	133	266	570

Эти табличные значения n являются оценочными, так как получены при расчетах идеализированного случая, поэтому для практических рекомендаций можно использовать удвоенные или даже утроенные значения рационального числа импульсов. Кроме того, полученные значения n могут быть использованы для оценок удельной потребляемой мощности ГИТ:

$$N = \frac{W_0 \cdot \tau}{n \cdot M_{об}}, \quad (2)$$

где W_0 – запасаемая энергия; $M_{об}$ – масса обрабатываемого металла; τ – время обработки.

ОПИСАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ЭГИО, ИЭО И МИО

В методах ИОР каналы внешнего воздействия имеют энергетическую природу, поэтому целесообразно акцентировать внимание именно на энергетических аспектах каждого из рассматриваемых в данной статье методов.

В зависимости от решаемых задач методом ЭГИО используют ГИТ с запасаемой энергией от 0,5 до 5 кДж. В работе [12] для сплавов на основе Al рассчитаны величины максимального значения давлений на торце волновода для этого диапазона энергий. Они лежат в пределах от 2 до 10 МПа, что соответствует плотностям вводимой энергии от 2 до 10 МДж/м³. При ИЭО сплавов на основе Al эффекты измельчения структуры и повышения механических свойств проявляются при значениях разрядного тока от 10 до 30 кА, что соответствует величине запасаемой энергии ГИТ от 0,2 до 1 кДж [11, 18]. Учитывая КПД преобразования энергии порядка 0,7, оценим величину энергии, поступающей в расплав, в пределах от 0,14 до 0,7 кДж. Тогда плотность энергии, сосредоточенной в объеме $V_{не}$, может быть оценена в пределах от $4 \cdot 10^4$ до $35 \cdot 10^8$ Дж/м³.

Применительно к МИО количество экспериментальных данных пока не позволяет относительно точно определить диапазон величин разрядных токов и величин запасаемой энергии ГИТ. Поэтому соответствующие оценки сделаем по энергетическим параметрам ГИТ для ИЭО, тогда плотность энергии, сосредоточенной в объеме $V_{не}$, примем в пределах от $8 \cdot 10^5$ до $10 \cdot 10^{10}$ Дж/м³.

Сравним полученные значения плотностей энергии ω , вводимой в объем $V_{не}$, с энергетическими характеристиками свойств расплава на основе Al.

Энергию связи атомов можно оценить величиной энергии испарения. Для алюминия $E_u = 4 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ [23]. Значения ω для ЭГИО на три порядка меньше этого, но, как установлено экспериментальными данными, при ЭГИО, как и при ультразвуковой обработке расплава, проявляются эффекты ультразвуковой кавитации [15, 17]. Здесь при схлопывании кавитационного пузырька уровень плотности энергии доходит до величины порядка $4 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ [24]. Значения ω для ИЭО на два порядка меньше E_u , а значения ω при МИО соответствуют уровню величины E_u . Технически возможно обеспечить значение ω для ИЭО порядка 10^{10} Дж/м³ за счет увеличения напряжения разряда, но при этом существенно возрастут габариты и потребляемая мощность ГИТ.

Важной функциональной задачей ИОР является активация процессов переноса (диффузии и вязкого течения). Для металлов энергия активации диффузии лежит в пределах от $0,055 \cdot 10^{10}$ до $0,55 \cdot 10^{10}$ Дж/м³, а энергия активации процессов вязкого течения – от $0,028 \cdot 10^{10}$ до $0,68 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ [23, 25]. То есть энергетические показатели импульсов при ЭГИО, ИЭО и МИО потенциально способны значительно снижать уровень энергии активации процессов переноса. Здесь необходимо отметить данные работы [26], где показано, что при формировании электрического поля в расплаве реализуются эффекты, названные электро-магнито-акустическими. То есть от скин-слоя с каждым разрядным импульсом излучается акустический фронт. Такой же фронт формируется и при ЭГИО [17], но если здесь он распространяется, рассеиваясь к днищу емкости с расплавом, то в случае ИЭО он концентрируется в определенной зоне в центре емкости, где и могут возникать в том числе и эффекты акустической кавитации.

В работе [27] методами термодинамики определены затраты энергии внешнего воздействия на процессы кристаллообразования, которые рассмотрены с точки зрения влияния объемной плотности энергии внешнего воздействия $E_{вн}$ на изменение свободной энергии, соответствующего образованию зародыша в равном ему объеме расплава. При этом для большой группы металлов рассчитаны значения $E_{вн}$. Для Al в случае гомогенной кристаллизации $E_{вн} \approx 8,5$ МДж/м³, в случае гетерогенной – на плоском зародыше $E_{вн} \approx 5,7$ МДж/м³, на зародыше с развитой поверхностью $E_{вн} \approx 0,3$ МДж/м³. Как видим, полученные нами оценки ω соответствуют этим условиям. То есть ЭГИО, ИЭО и МИО в надликвидусной зоне могут обеспечить активное увеличение количества центров кристаллизации во всем объеме расплава, что является залогом получения мелкодисперсной структуры литого металла.

Импульсные процессы имеют волновую природу, а, как было отмечено выше, импульсы возмущений при ИОР имеют поличастотный спектр. В этом случае возможно проявление эффектов резонанса в расплаве [28], генерируемого на какой-то из возмущающих частот спектра. В работе [26] показано, что структура металлической жидкости может быть представлена в виде флуктуирующих малых частиц – первой координатной сферы, больших образований – кластеров. Для них в [26] вычислены различные характерные частоты вибраций вблизи температуры начала кристаллизации. Они лежат в пределах:

- для коэрцитивных вращательных движений – от 10 до 10^3 кГц;
- для собственных вращательных движений – от 1 до 10^4 кГц;
- для вращательных движений малой структурной единицы – от 1 до 10^5 кГц.

Кроме того, в работе [29] показано, что физико-химические процессы кристаллизации сопровождаются интенсивной акустической эмиссией, основные гармоники которой укладываются в спектр от 10^2 до 10^5 Гц.

Энергетически насыщенные частотные диапазоны спектров импульсов при ИОР (до десятков кГц) [11, 12] соответствуют отмеченным диапазонам частот. Но здесь необходимо акцентировать внимание на том, что для возникновения резонанса нужно не только обеспечить равенство частот возмущающей силы с собственной частотой элемента, но и показать величину добротности потенциального колебательного контура.

ВЫВОДЫ

1. Ни один метод внешнего воздействия на расплав не является универсальным, его выбор определяется целью обработки. Но каждый из рассмотренных методов ИОР, обладая широкими функциональными возможностями, может быть успешно использован в технологических процессах для позитивного изменения кристаллизационной способности расплава – ключевого фактора в формировании свойств литого металла.

2. Значения энергетических параметров импульсов при ЭГИО, ИЭО и МИО потенциально способны напрямую влиять на атомарный и субатомарный уровни в иерархии структуры жидкого металла, на которых и происходят элементарные акты ее перестройки [8].

3. На основе полученных в данной работе данных на стадии выбора метода внешнего воздействия на расплав [7] можно оценить его технологические возможности в решении поставленных задач обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валуев Д.В. *Разливка и кристаллизация стали и сплавов*. Учебное пособие. Томск.: ЮТИ ТПУ, 2009. 235 с.
2. Салли И.В. *Кристаллизация сплавов*. К.: Наукова думка, 1974. 238 с.
3. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. *Технологии современной металлургии*. М.: Новые технологии, 2004. 784 с.
4. Найдек В.А. Процессы внеагрегатной обработки металлических расплавов массового использования. *Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя*. К.: Наукова думка, 1998. 133–155.
5. Ефимов В.А. *Влияние внешних воздействий на процессы формирования отливок. Специальные способы литья*. Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 734 с.
6. Wanqi Jie. Progress of Solidification Researches and the Applications in Materials Processing. *Mater Sci Tech Ser.* 2001, **17**(05), 575–576.
7. Цуркин В.Н. Принципы системного подхода к выбору метода внепечной обработки расплава. *Металл и литье на Украине*. 2009, (7), 12–16.
8. Цуркин В.Н. Влияние системы структуры металлического расплава на его физические свойства. *Вісник Українського матеріалознавчого товариства*. 2011, (4), 11–19.
9. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. *Влияние импульсного электрического тока высокой мощности на прочность металлических материалов и напряженно-деформированное состояние элементов конструкций*. Киев: Наукова думка, 2014. 277 с.
10. Петушков В.Г. Кудинов В.М., Фадеенко Ю.И. *Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций*. М.: Металлургия, 1993. 161 с.
11. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Bogoslavskaya A.S. A Study of the Electromagnetic and Hydrodynamic Processes in a Liquid-metal Conductor Exposed to Current Pulses. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2011, **47**(1), 28–34.
12. Tian W., Zhang G. Electro-pulse Modification and Reheating Process for Production of Thixotropic Microstructure in AlSi₇Mg Alloy. *Trans Nonferrous Met Soc China*. 2010, (20), 943–947.
13. Баум Б.А. *Металлические жидкости – проблемы и гипотезы*. М.: Наука, 1979. 120 с.
14. Приходько Э.В., Петров А.Ф. Физико-химические критерии оценки степени микронеоднородности металлических расплавов. *Металлофизика и новейшие технологии*. 1998, **20**(7), 64–74.
15. Дубоделов В.И., Середенко В.А., Фикссен В.Н., Слажнев Н.А., Цуркин В.Н., Грабовый В.М., Крептюк Я.В. Оценка технологической эффективности режимов комплексной магнитогидродинамической и электрогидроимпульсной обработки алюминиевых сплавов. *Процессы литья*. 2006, (3), 81–86.
16. Щерба А.А., Дубовенко К.В. *Высоковольтные электроразрядные компактные системы*. Киев: Наукова думка, 2008. 269 с.
17. Kim K. H., Tsurkin V. M., Sinchuk A. V., Trojanová, Z. The Microstructure Changes in the Grain Refined Al-Si-Mg Alloy with the Electro Hydro Pulse Treatment. *Metallic Materials*. 2012, **50**, 373–377.
18. Tsurkin V.N., Sinchuk A.V., Ivanov A.V. Electric Current Treatment of Liquid and Crystallizing Alloys in Casting Technologies. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2011, **46**(5), 456–464.
19. Chunyan Ban, Han Yi, Qixian Ba, Cui Jianzhong. Influence of Pulse Electric Current on Solidification Structure of Al-Sn Alloy. *EPM*. 2007, (8), 34–37.

20. Чугунный Е.Г. Магнитоимпульсная обработка кристаллизующихся расплавов. *Литейное производство*. 1996, (1), 12–14.
21. Черников Д.Г., Глушников В.А., Никитин В.И., Никитин К.В. Совершенствование способа магнитно-импульсной обработки алюминиевых расплавов. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014, **16**(6), 256–262.
22. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Ruban H.S. Effect of the Technological Parameters of the Melt Treatment by Electric Pulse Current on the Mixing Process. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2012, **48**(2), 180–186.
23. Смитлз К.Дж. *Металлы*. М.: Металлургия, 1980. 447 с.
24. Абрамов О.В., Добаткин В.И., Казанцев В.Ф., Кулевин А.В., Некрасова С.З., Панов А.П., Пугачев С.И., Семенова Н.Г., Статников Е.Ш., Эскин Г.И. *Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов*. М.: Наука, 1986. 277 с.
25. Еланский Г.Н. *Строение и свойства металлических расплавов: учеб. пособие для вузов*. М.: Металлургия, 1991. 160 с.
26. Зарембо В.И. Влияние импульсов тока на процессы плавления и кристаллизации металлов. *Металлургия машиностроения*. 2003, (1), 11–15.
27. Балакин Ю.А., Гладков М.М. О взаимосвязи расхода энергии внешнего воздействия и структуры затвердевающего металла. *Металлы*. 2001, (3), 20–25.
28. Цуркин В.Н. К вопросу о резонансных процессах при обработке расплава в технологиях литейного производства. *Процессы литья*. 2012, (5), 30–35.
29. Арсентьев П.П., Коледов Л. А. *Металлические расплавы и их свойства*. М.: Металлургия, 1976. 375 с.

Поступила 24.12.14

Summary

General signs of functional possibilities of methods of electrohydropulse, pulse electro-current, and magnetic pulse treatments of fusion to positively change its crystallization ability are considered.

Keywords: fusion, pulse treatment, crystallization ability, energy factors.