

3. Повышение твердости и коррозионной стойкости хирургических имплантатов путем формирования на их поверхности тонких керамических пленок. Hardness and corrosion protection enhancement behavior of surgical implant surfaces treated with ceramic thin films/ Hubler R // Surface and Coat. Technol. 1999. 119.Sep. С. 1111–1115.
4. Влияние ионной имплантации углерода на структуру и коррозионную стойкость титанового сплава ОТ-4-0. Effekt of carbon ion implantation on the structure and corrosion resistance of OT-440 titanium alloy /Krupa D., Jagielski J., and other. // Surface and Coat. Technol. 1999. N 2–3. С. 250–259.
5. Севидова Е.К., Степанова И.И., Рой И. Д., Машикина О.Ю. Формирование защитных интерференционных пленок на титановых сплавах в растворах солей ортофосфорной кислоты // Электронная обработка материалов. 2004. № 6. С. 19–24.
6. Фокин М.Н., Рускол Ю.С., Мосолов А.В. Титан и его сплавы в химической промышленности: Справочное пособие. Л.: Химия, 1978. 200 с.

Поступила 02.06.06

Summary

Here are the results of research of activity of bioengineering titanic alloys – OT4-1, BT-5, BT3-1, BT14, BT16 with different treatment of surface. It is set that most sluggishness in physiological solution (0,9% th NaCl) is characterize α - alloys OT4-1 and BT-5, the surface of which is preliminary polished by a mechanical method with the subsequent anodizing in solution of potassium phosphate. Intermediate poisoning of surface before the receipt of films of oxides of anodes preferably to conduct by boiling in a 10% solution of the calcinated soda. On the alloys of BT3-1 and BT16 the anode oxidizing results in the substantial activating of processes of anodes as compared to mechanically polished.

В.Н. Цуркин, В.М. Грабовый, А.В. Синчук

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА В КОВШЕ

*Институт импульсных процессов и технологий НАНУ,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Научные фундаментальные и прикладные проблемы обработки материалов высококонцентрированными (во времени и/или пространстве) потоками энергии определяют постановку и решение задач, направленных на изучение путей и методов получения высоких показателей воздействия.

Обработка расплава вне печного агрегата осуществляется различными технологическими методами, которые имеют разные функциональные возможности по повышению качества литого металла. Как подчеркнуто в [1], практически все методы внепечной обработки являются многофункциональными, многоцелевыми, но не универсальными, а значит, не решают полностью все задачи оптимальной подготовки расплава к разливке. Иными словами, ни один из методов не дает 100% степени обрабатываемости расплава, то есть возможности сформировать оптимально состав, структуру и свойства литого металла через изменение расплава перед разливкой.

Серьезной проблемой здесь выступают многофакторность происходящих при внепечной обработке процессов и учет адаптации обработанного металла к условиям литья. Опыт показывает, что интегрально обрабатываемость расплава можно рассматривать по таким показателям, как дегазация и рафинирование от нежелательных включений, его гомогенизация в макрообъеме, активация потенциальных центров зародышеобразования. Эти явления многофакторные и взаимообусловленные, однако из-за отсутствия стройной теории внепечной обработки расплавов, сведенной к формализации процессов даже в рамках допущений и ограничений, часто приходится рассматривать

задачи анализа отдельных процессов в рамках модельных представлений, впоследствии синтезируя эффект последствия. Но для формирования методологии синтеза многофакторных взаимообусловленных подсистем, способной адекватно описать обрабатываемость материала, необходимо учесть, что различные методы обработки воздействуют на материалы по различным механизмам, а конечный результат зависит от его способности воспринимать это воздействие. Поэтому для того чтобы увязать количественными зависимостями параметры нагружения с требуемыми, нужно описать основные аспекты, характеризующие процессы обработки на уровне функций технологического метода. В конечном итоге это позволит выработать стратегию управления или на уровне экспертных процедур, или же на основе теории обработки.

В данной статье в рамках моделей гидроакустики и гидродинамики выполним качественный анализ факторов, определяющих функциональные возможности метода внепечной электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) расплава, и покажем критерий его обрабатываемости. При этом под функциональными возможностями технологического метода обработки будем понимать потенциально реализуемые инструментом обработки в объекте воздействия физических процессов, совокупность которых может приводить к изменению его структуры и свойств.

Метод электрогидроимпульсной обработки жидких и кристаллизующихся сплавов неоднократно проходил промышленную апробацию и хорошо зарекомендовал себя как недорогое и эффективное средство повышения качества литой продукции. В настоящее время интенсивно развивается одна из его разновидностей – ковшевая ЭГИО, которая предполагает введение в объем расплава периодических импульсов давления через волноводно-излучательную систему. На рис. 1 приведена схема электроразрядного генератора упругих колебаний (ЭРГУК), который используется для ковшевой ЭГИО. Это достаточно простой по реализации вид обработки, поскольку исключает необходимость подвода колебаний к отдельно взятой изложнице или отливке; экономичный, так как позволяет обрабатывать большие массы расплава в ковше при незначительных удельных энергозатратах (до 2 кВт·ч/т), и эффективный, так как относительно успешно решает комплекс проблем по рафинированию, дегазации, гомогенизации расплава, улучшению структуры и свойств отливок.

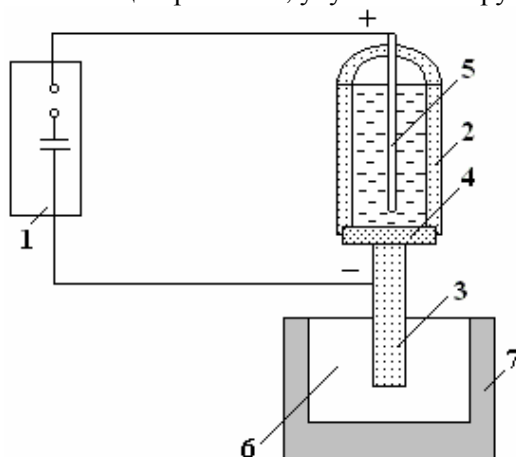


Рис. 1. Блок-схема оборудования для ЭГИО расплава в ковше: 1 – генератор импульсных токов; 2 – ЭРГУК; 3 – волновод; 4 – мембрана; 5 – электрод; 6 – расплав; 7 – ковш

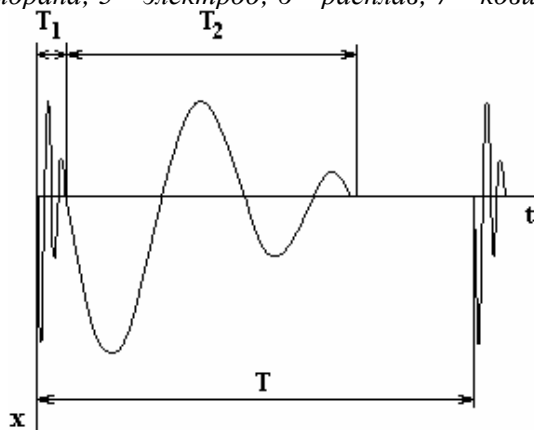


Рис. 2. Перемещение торца волновода в пределах одного импульса нагружения длительностью T . T_1 – длительность первой стадии; T_2 – длительность второй стадии

На сегодняшний день накоплен опыт ковшевой ЭГИО сталей, чугунов, алюминиевых и свинцовых сплавов [2–5]. Тем не менее, несмотря на положительную сторону достигнутых результатов по качеству металла, до сих пор отсутствуют четкие рекомендации по энергетическим режимам обработки различных сплавов, что позволило бы шире использовать электрогидро-импульсную технологию в промышленности. Расплавы, подвергаемые ЭГИО, могут существенно различаться прежде всего по своей физической природе, что не может не отражаться на их технологической обрабатываемости.

В свое время вопрос о технологической обрабатываемости различных металлов активно развивался исследователями, использующими аналогичный способ воздействия на расплавы – ультразвуковую обработку [6, 7]. Например, в [6] предпринята попытка увязать ультразвуковую обрабатываемость металлов с кристаллической решеткой различных типов. В [7] показано, что чистые металлы с более высокой твердостью, которую замеряли при температуре на 2–5⁰С ниже плавления, в жидком состоянии обладают более высокими значениями пороговой мощности ультразвуковой обработки и меньшим коэффициентом измельчения структуры.

По физической сущности ЭГИО более сложный, чем ультразвуковая обработка, многостадийный вид обработки [8]. Здесь нагружение расплава осуществляется кратковременными, дискретно повторяющимися импульсами, каждый из которых можно изучать по двум основным стадиям. Далее упростим задачу, не рассматривая более простую по описанию третью стадию колебаний ЭРГУКа на упругой подвеске. Сделаем допущение, что подвеска ЭРГУКа является достаточно жесткой и торец волновода не имеет возможности колебаться с частотой, равной $\sqrt{C/M}$ (где C – жесткость подвески; M – масса ЭРГУКа). Оценки показывают, что значение этой частоты для третьей стадии лежит в пределах единиц Гц.

На первой стадии при электрическом разряде в межэлектродном промежутке ЭРГУКа (рис. 1) возникает плазменный канал, давление которого создает волновой процесс в стержне-волноводе 3, и его торец генерирует в расплаве акустическое волновое поле. Временная длительность этого возмущения лежит в микросекундном диапазоне. После разрядной стадии в ЭРГУКе идет образование парогазовой полости, деформирующей упругую мембрану, а торец волновода, который не деформируется, как на первой стадии, уже в миллисекундном диапазоне времен формирует в расплаве течения. Схематично на рис. 2 показан характер движения торца волновода в пределах одного импульса. Рассмотрим отдельно эти две стадии, показав общие тенденции формирования возмущений в расплаве.

Первая стадия. Как показано ранее [9], зависимость максимального давления P_g^{\max} , возникающего на первой стадии в волноводе вблизи его торца, пропорциональна энергии, запасаемой в конденсаторной батарее W_0 :

$$P_g^{\max} \sim \kappa \cdot \sqrt{W_0}, \quad (1)$$

где κ – коэффициент, учитывающий характер разряда и площадь поперечного сечения волновода. Отметим, что сам процесс передачи давления в расплав сопровождается определенными энергетическими потерями, так как граница “торец волновода – расплав” представляет собой границу раздела двух сред с различными волновыми сопротивлениями. Определить уровень прошедшего в расплав давления P_p^{\max} можно из известных соотношений акустики:

$$\frac{P_p^{\max}}{P_g^{\max}} = \frac{4m}{(1+m)^2}, \quad (2)$$

$$m = \frac{\rho_g C_g}{\rho_p C_p}, \quad (3)$$

где ρ_v , ρ_p – плотность материала волновода и расплава; C_g , C_p – скорость продольной звуковой волны в материале волновода и расплава соответственно.

Чем больше разность между акустическими сопротивлениями сред, тем больше энергетические потери, что неизменно будет сказываться на обрабатываемости расплава. В таблице приведены соответствующие данные для литейных металлов, относящихся к различным группам. Для расчетов взяты справочные данные [10], а в качестве материала волновода выбрана сталь Ст3, как правило, используемая для изготовления волноводно-излучательных систем в электрогидроимпульсных устройствах. Видно, что при одних и тех же энергетических затратах ЭГИО различных металлов на стадии передачи разрядного импульса давления в расплав будет сопровождаться различными энергетическими потерями, которые, например для алюминия, могут составлять до 30 %. Это обстоятельство

следует учитывать в основном в том случае, когда применяются низкоэнергетические режимы обработки, которые обеспечивают генерацию давлений в расплаве незначительно выше его кавитационной прочности. К тому же, согласно литературным данным [6, 7], алюминиевые расплавы характеризуются довольно высоким (0,65–1,3 МПа) порогом кавитации в сравнении с железом и свинцом (0,1–0,2 МПа).

Акустические характеристики металлов

Металл	$c_v \rho_v$, 10^{-5} кг/с·м ²	$c_p \rho_p$, 10^{-5} кг/с·м ²	m	P_p^{max} / P_v^{max}
Al	396	110	3,6	0,68
Fe		370	1,07	0,99
Pb		204	1,9	0,90

Очевидно, что существует путь для уменьшения энергетических потерь обработки на основе подбора материала волновода. Однако более простой путь – учитывать эти неизбежные потери, обусловленные физической природой обрабатываемой среды, а для труднообрабатываемых расплавов – использовать более высокоэнергетические режимы нагружения.

На первой стадии основная функция ЭГИО сводится к формированию в расплаве акустических волн, которые могут вносить существенные изменения в свойства среды. Правда, при этом в расплаве возникают локальные акустические потоки. Они развиваются: в вязком пограничном слое расплава вблизи препятствий, в роли которых могут выступать нерастворенные примеси и газовые пузырьки; внепограничного слоя; в свободном неоднородном звуковом поле. Масштабы этих потоков для гармонического, например ультразвукового нагружения, определяются достаточно просто [7].

Масштаб вязкого пограничного слоя порядка 2δ , где δ определяется как $\sqrt{2\nu/\omega}$ (здесь ν – кинематическая вязкость, ω – частота). Масштаб течений внепограничного слоя $\sim \lambda$, где λ – длина звуковой волны. Масштаб третьего класса течений существенно больше λ .

Характер этих локальных потоков при ЭГИО существенно отличается от таковых при ультразвуковой обработке, так как поле давлений, генерируемое в расплаве при ЭГИО, является нестационарным и его амплитудно-частотный спектр – от нуля до сотни кГц [9]. К сожалению, еще не решены задачи точного описания течений в расплаве при возникновении существенно нестационарных волновых процессов, и здесь нет оценок временных и пространственных масштабов микротечений. Но, прибегая к аналогии с обработкой расплава ультразвуком, можно ожидать, что при ЭГИО потоки, возникающие в пограничном слое, уменьшают его толщину, ускоряют процессы теплопередачи и растворимости. Более масштабные потоки вызывают перемешивание расплава и приводят к его гомогенизации.

Другой важной функцией первой стадии ЭГИО является генерирование объемной акустической кавитации, когда в локальных зонах расплава образуются разрывы жидкости прежде всего на кавитационных зародышах. При схлопывании кавитационных пузырьков возникают давления, сопоставимые с порядком плотности энергии связи атомов в расплаве. Это приводит к повышению топологического беспорядка в жидком металле, уменьшению его координационного числа, повышению энтропии системы. Важным результатом такого воздействия является эффект искусственного переохлаждения локальных зон расплава, а значит, образование дополнительных центров кристаллизации [11]. В конечном итоге это приводит к измельчению зеренной структуры металла.

Технические возможности оборудования для ЭГИО расплавов позволяют генерировать в его объеме на первой стадии уровни давлений, превышающие кавитационную прочность расплава. Но динамика кавитационного пузырька (пульсация, осцилляция, всплытие), например в расплавах на основе железа и алюминия, может быть разной из-за различий в физических свойствах этих жидкостей, прежде всего плотности, вязкости и поверхностного натяжения. В то же время конкретно процесс схлопывания акустического пузырька, который и вызывает уровни давлений $P_{схлоп}$, способные влиять на межатомные связи в расплаве, в соответствии с известной аппроксимацией Херринга-Флинна, не зависит от физических свойств расплава:

$$P_{схлоп} = P_{nz} \left(\frac{R_{max}}{R_{min}} \right)^{3\gamma}, \quad (4)$$

где P_{nc} – давление пара и газа внутри пузырька максимального радиуса; R_{max} , R_{min} – максимальный и минимальный радиусы пузырька соответственно; γ – показатель адиабаты. Таким образом, можно говорить об использовании единого подхода к процессам акустической кавитации в расплавах разного состава.

Вторая стадия. К сожалению, специалисты, занимающиеся исследованиями в области ЭГИО расплавов, практически не анализировали процессы, характеризующие эту стадию. Основной причиной здесь, на наш взгляд, является то, что поведение парогазовой полости в ЭРГУКе, который представляет собой закрытый объем, существенно зависит от его геометрии. Это значительно усложняет описание характера изменения нагрузки на упругую мембрану.

Без подробного описания процессов в ЭРГУКе на стадии пульсации парогазовой полости были выполнены оценочные расчеты и скорости перемещения торца волновода при деформации мембраны [12]. При этом рассмотрена задача колебаний пластины в одномерной постановке с учетом массы волновода, который считается абсолютно жестким и колеблющимся соответственно полюсу мембраны. Жидкость в камере идеальна и сжимаема, но нагрузка от парогазовой полости рассмотрена в квазистатическом приближении как равномерно распределенная по поверхности мембраны. Профиль нагрузки – полуволна синусоиды. Теплопередача от расплава к волноводу не учитывается, но принимаются во внимание демпфирующие свойства расплава, диссипативные силы волнового и вязкостного сопротивления, присоединенная масса жидкого металла и восстанавливающая сила Архимеда. Для широкого диапазона варьируемых параметров (W_0 , диаметр и толщина мембраны, вязкость и плотность расплава) установлены три важных для этой статьи положения: скорость перемещения торца волновода на второй стадии v_6 лежит в пределах от 10^{-2} до 10 м/с; $v_6 \sim \sqrt{W_0}$; колебательный процесс на второй стадии длится не более нескольких миллисекунд.

Роль второй стадии – развитие в расплаве интенсивных течений, что способствует перемешиванию в объеме ковша, когда появляются пульсации давления ΔP порядка $\rho_p v_6^2$. Это приводит к гомогенизации металла, развитию окислительно-восстановительных реакций, внутренним структурно-кинетическим изменениям. Кроме того, этим течением кавитационное облако, образованное на первой стадии, “выбрасывается” ко дну жидкого металла, где изменяется металлостатическое давление, а значит, изменяется динамика кавитационного пузырька.

Полученному в расчетах интервалу скоростей соответствуют числа Рейнольдса Re , которые для разных сплавов и характерного масштаба, равного диаметру волновода, могут оставлять значения, существенно превышающие 10^3 . Это обстоятельство позволяет утверждать об образовании неустойчивостей в течениях – турбулентности, которая характеризуется беспорядочным изменением скорости во времени в каждой точке и от точки к точке [13]. Масштабы этих пульсаций разные. При этом происходит переток энергии от крупномасштабных пульсаций к менее масштабным, кинетическая энергия переходит в тепло, энтропия системы увеличивается. Среднее количество энергии, диссипируемой в единицу времени в единицу массы вещества, $\epsilon \sim (v^3/l)$, где v – пульсации скорости в масштабе. Кроме того, именно пульсации мелких масштабов приводят к расхождению частиц, находящихся в среде, так что время расхождения пропорционально $x^{4/3}/\epsilon^{1/3}$ (где x – расстояние, на которое разойдутся частицы). Можно говорить о том, что практически одинаково эти процессы будут протекать в расплавах на основе различных металлов, так как амплитуды скоростей и времена определяются порядком надкритичности течений, складывающих величину $(Re - Re_{кр})^{1/2}$.

Как отмечалось выше, для стадии пульсации парогазовой полости характерные времена движения торца волновода составляют несколько миллисекунд. Учитывая релаксационный характер течений, мы вправе ожидать их затухание в более позднее время. К сожалению, постановка и решение этой задачи даже в пределах существенных допущений и ограничений являются объемными и не могут рассматриваться в рамках этой статьи. Но при определенной частоте посылок импульсов $f=1/T$ (рис. 1) мы вправе ожидать, что следующий цикл нагружения будет приходиться на расплав, находящийся в интенсивном движении. Это снижает порог кавитации и усложняет волновую и гидродинамическую картины.

Тот факт, что и для второй стадии $v_6 \sim \sqrt{W_0}$, позволяет нам выбрать именно величину запасаемой энергии в качестве некоторого интегрального параметра нагружения при синтезе двух стадий, так как единица массы жидкости при движении дополнительно к тепловой энергии переносит энергию, пропорциональную квадрату скорости. Но, учитывая дискретность нагружения, возьмем произведение $W_0 \cdot f \cdot \tau$ (где τ – время обработки), которое по сути является интегральной мощностью. В качестве параметров, характеризующих объект нагружения в модели, описывающей акустические и

гидродинамические процессы, можно взять плотность расплава ρ_p , его объем V_p и скорость распространения звука C_p . Объединяя эти параметры, по π -теореме можем построить одно безразмерное соотношение:

$$\omega = \frac{W_0 \cdot f \cdot \tau}{V_p \cdot \rho_p \cdot C_p^2} \quad (5)$$

Сразу же оговорим, что использование такого соотношения на практике проблематично. По физической сути оно может быть верным, но его численное значение нельзя принять за основу прежде всего потому, что значение W_0 нужно “исправлять” на потери при трансформации энергии от накопителя до обрабатываемого объема. Кроме того, нужно ли рассматривать весь объем расплава? Ведь за один цикл нагружения обрабатывается только определенная зона вблизи торца волновода, объем которой зависит от его диаметра, величины скорости смещения и физических свойств расплава. Эта зона на первой стадии явно не будет цилиндрической в силу рассеяния и поглощения звуковых волн. Отклонение от цилиндрической формы будет и на второй стадии, так как при наличии пульсаций давления ΔP у торца волновода близлежащие слои спокойной жидкости будут вовлекаться в течение. Причем время изменения скорости в заданной точке пространства существенно меньше времени движения в целом, которое для второй стадии имеет порядок 10^{-3} с. Таким образом, можно говорить о быстром вовлечении в движение спокойной жидкости, которая граничит с течением.

Сделаем некоторые оценки. Исходя из уравнения Бернулли, можем записать отношение скоростей в разных сечениях r_1 и r_2 потока, возникающего на второй стадии, как $v_1/v_2 = (r_2/r_1)^2$. Если предположить, что по направлению от торца волновода ко дну ковша поток распределяется по расширяющемуся конусу, угол которого интуитивно примем равным 60° , то несложно показать, что на расстоянии x получим $v_1/v_2 = 10$, если $x/r_1 = 3,8$. Если r_1 – радиус торца волновода, то уже на расстоянии трех-четырех радиусов интенсивность воздействия существенно снизится. Объем этого пространства V_k составит величину порядка $50 \cdot r_1^3$. Так, для $r_1 = 50$ мм (это значение часто используется на практике для обработки промышленных объемов) $V_k = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Например, для железуглеродистого расплава массой 10 т его объем $V_p = 1,3 \text{ м}^3$, то есть отношение объемов V_k и V_p составляет практически два порядка.

Нами проанализирован большой массив экспериментальных данных, полученных в заводских условиях по ЭГИО различных масс и марок сплавов почти за 20 лет. Оказалось, что соотношение (5) для них с небольшим разбросом в пределах одного порядка принимает следующие значения: $5 \cdot 10^{-5}$ – для чугуна; $3 \cdot 10^{-5}$ – для стали; $10 \cdot 10^{-5}$ – для алюминиевых сплавов. В то же время значения ω для лабораторных условий ЭГИО, когда масса обрабатываемого металла составляла примерно 30 кг, что соответствует объему расплава V_k ($V_p = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ – для стали; $V_p = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ – для чугуна; $V_p = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ – для Al-сплавов), лежат соответственно в пределах: $5 \cdot 10^{-3}$; $4 \cdot 10^{-3}$; $0,5 \cdot 10^{-3}$. Несложно заметить, что среднестатистическое отношение V_p/V_k для каждого из сплавов и составляет указанные выше два порядка.

Следовательно, в формуле (5) целесообразно в качестве параметра, характеризующего металл, принимать объем V_k , обрабатываемый за один цикл нагружения, и уже в таком виде принимать соотношение (5) за базовое для построения окончательного критерия, учитывающего подобие акустических и гидродинамических процессов при ЭГИО различных расплавов. При этом значение W_0 должно быть “исправлено” на потери, возникающие при трансформации энергии от накопителя до расплава, то есть в соотношении (5) в качестве W_0/V_k нужно брать плотность вводимой в расплав энергии. С физической точки зрения – это давление, которое генерируется при ЭГИО в жидком металле.

Таким образом, в данной статье на качественном уровне описаны основные функциональные возможности ЭГИО расплава в ковше. С точки зрения потенциальной реализуемости гидроакустических и гидродинамических процессов в расплаве это приводит к изменению его структуры и свойств, а значит, и к увеличению показателей обрабатываемости. Показана возможность использования единого подхода для количественной оценки обрабатываемости различных расплавов с применением безразмерного соотношения, связывающего параметры электрогидроимпульсного нагружения и обрабатываемого расплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Найдек В.Л.* Процессы внеагрегатной обработки металлических расплавов массового использования // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. Киев: Наук. думка, 1998. С. 133–154.

2. Ульянов В.А., Бутаков Б.И., Ризун А.Р., Фоменко К.П., Грабовый В.М. Эффективность обработки жидкого и кристаллизующегося металла в ковше и изложнице упругими колебаниями // Процессы разливки стали и качества слитка. Киев: Наук. думка, 1989. С. 35–38.
3. Волков Г.В., Грабовый В.М., Синчук А.В. Обработка чугуна концентрированными потоками энергии // Литейное производство. 1998. № 1. С. 12–14.
4. Шейгам В.Ю., Семенченко А.И., Грабовый В.М., Федченко Н.А., Белик В.И., Шеневидько Л.К. Эффективность электрогидроимпульсной обработки вторичных алюминиевых сплавов // Процессы литья. 2002. № 1. С. 21–25.
5. Грабовый В.М., Волков Г.В., Синчук А.В., Федченко Н.А., Цуркин В.Н. Об использовании электрогидроимпульсной обработки сплавов свинца // Metallurgy машиностроения. 2002. № 3(6). С. 8–10.
6. Абрамов О.В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. М.: Metallurgy, 1972. 256 с.
7. Абрамов О.В., Добаткин В.И., Казанцев В.Ф. и др. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов. М.: Наука, 1986. 277 с.
8. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев: Наук. думка, 1990. 208 с.
9. Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. Расчетная методика для определения влияния параметров разряда на характеристики акустического поля в расплаве при электрогидроимпульсной обработке // Электронная обработка материалов. 2004. № 1. С. 82–87.
10. Таблицы физических величин: Справочник / Под. ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.
11. Цуркин В.Н., Синчук А.В. Термодинамический анализ внешнего электрогидроимпульсного воздействия на состояние расплава перед разливкой и процессы кристаллизации // Процессы литья. 2004. № 1. С. 6–9.
12. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Влияние геометрических характеристик электроразрядного генератора упругих колебаний на перемещение рабочего элемента на послеразрядной стадии // Электронная обработка материалов. 2006. № 1. С. 63–70.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. 3-е изд., перераб. М.: Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1986. 736 с.

Поступила 06.04.06

Summary

The analysis of factors, which are determining for functional potentialities of out furnace electrical hydro pulse treatment of melt, is fulfilled within the framework of hydroacoustical and hydrodynamic models. Technological workability data of various foundry alloys are given. The nondimensional relation, which is essential for the quantity estimate of workability, is presented. Similarity of acoustical and hydrodynamic processes within various melt is taken into account by means of its relation.
