

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ И ЕЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИИ С МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ РАСПЛАВА

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@iipt.com.ua*

Введение

Технологические способы внепечной обработки расплава рассматривают как приемы подготовки жидкого металла к разливку и как один из инструментов управления качеством литой продукции. С учетом многофункциональности этих способов необходимо соблюдать принцип физико-химической интеграции процессов обработки расплава при их технологической дифференциации [1]. При этом алгоритмы управления качеством продукции строятся до уровня принятия решений тем эффективнее, чем больше накоплено и систематизировано экспериментальных данных о функциональных зависимостях между внутренними структурно-кинетическими изменениями в металле и внешними структуроформирующими параметрами обработки.

Проведенные ранее во ФТИМС и ИИПТ НАН Украины совместные исследования показали, что комплексная внепечная обработка расплава в одном технологическом модуле, включающая магнитодинамическую обработку (МГДО) и электрогидроимпульсную обработку (ЭГИО), может успешно использоваться в литейном производстве для подготовки жидкого металла к разливку [2, 3]. Схема комплексного нагружения металла, которая используется в реальных условиях МГДО и ЭГИО, показана на рис. 1. При ЭГИО в расплав вводятся дискретно повторяющиеся мощные поличастотные импульсы давления. Ее функциональные возможности определяются многофакторными взаимообусловленными акустическими и гидродинамическими процессами, протекающими в расплаве в виде объемной акустической кавитации и гидродинамических течений [4, 5]. Их роль является ключевой в достижении таких эффектов обработки, как гомогенизация и рафинирование расплава, перестройка его структуры вплоть до атомарной [4, 6]. Процессы, протекающие в расплаве при МГДО, частично совпадают с процессами, протекающими при ЭГИО, но развиваются по иным механизмам [7].

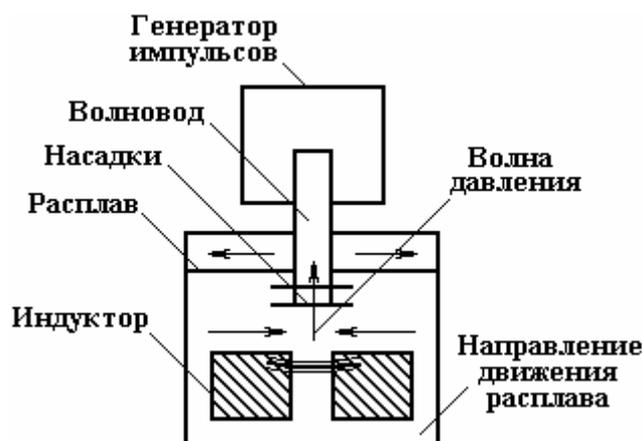


Рис. 1. Схема комплексной обработки расплава (МГДО + ЭГИО)

Ранее в работах [2, 3] исследованы физические и технологические возможности модуля, построенного по принципу совмещения МГДО и ЭГИО. Результативность комплексной обработки изучалась в натуральных экспериментах с привлечением методик металловедческого анализа, для изучения литых образцов. Такой подход позволяет судить о качестве обработанного металла, но не дает прямых данных о физических процессах, протекающих в жидкости непосредственно во время комплексной обработки. Таким образом, представляется актуальным получение дополнительной экспериментальной информации, которая позволит не только понять механизмы комплексного воздействия на жидкую среду, но и явится основой для дальнейшего построения алгоритма управления этими физическими процессами, а следовательно, и качеством литой продукции.

В данной работе эта задача решалась методом физического моделирования на прозрачной жидкости. Модельной средой выбрана вода, подогретая до 50°C , которая часто используется для решения задач физического моделирования высокотемпературных металлургических процессов. Здесь необходимо заметить, что полное моделирование гидродинамических и акустических процессов в жидком металле встречает серьезные трудности, не позволяющие построить набор основных динамических критериев подобия, принятых в гидродинамике и акустике. В большинстве случаев нет достоверных экспериментальных данных о важнейших, в этой постановке задачи, свойствах жидких металлов и сплавов, отсутствуют экспериментальные подтверждения автомодельности процессов по отношению к тому или иному критерию подобия. Нет научно обоснованных данных о кооперативном действии сил, возникающих в природе (инерционные, индукционные, гидродинамические, силы тяжести, давления, вязкости, поверхностного натяжения), что затрудняет определение условий совместимости моделирования. Как отмечено в работе [8], такая неопределенность позволяет рассматривать модели как аналогичные, а не подобные оригиналу, то есть когда есть возможность пересчета данных, полученных на модели, к данным природы с помощью критериев подобия и выбранных масштабов. Тем не менее даже частичное удовлетворение полного набора основных критериев подобия позволяет на сегодня прогнозировать сценарии протекания процессов в природе по данным модельных исследований с точностью до их аналогичности.

Проанализируем возможности обеспечения подобия исследуемых нами процессов.

Как ранее показано [3, 7], результаты обработки расплавов зависят от схем прокатки жидкого металла в МГД-устройстве, его температуры T и скорости G , а также от параметров ЭГИО (запасаемой энергии W_0 единичного импульса и частоты следования импульсов f). Как отмечено в [9], степень влияния ЭГИО можно увеличить, используя насадки на торце волновода. Им отводится ключевая роль в формировании зоны объемной акустической кавитации, геометрические размеры которой зависят от площади поршня, возмущающего жидкость. При неизменных энергетических параметрах ЭГИО и площади торца волновода S_B насадка площадью $S_H > S_B$ позволит увеличить объем зоны образования кавитационного облака. Но чрезмерное увеличение S_H за счет возрастания присоединенной массы жидкости приведет к уменьшению скорости и величины перемещения торца волновода, что ослабит эффект образования кавитации. Кроме того, две и более насадок, размещенных на определенном расстоянии друг от друга, позволят получить между ними зоны турбулизации потока за счет сопряжения волн сжатия и растяжения. Таким образом, можно получить эффект акустического насоса, способствующий дополнительному нагружению расплава.

Вышеизложенные условия были положены в основу построения модельных стендов. Постановка эксперимента предусматривала два этапа исследований, что, во-первых, значительно упростило общее количество дорогостоящих опытов, обязательных для набора статистики, и, во-вторых, позволило рассмотреть по принципу дифференциации процессы, характеризующие каждый из используемых способов обработки в отдельности. На первом этапе изучались только физические процессы при ЭГИО, на втором – процессы комплексной обработки МГДО + ЭГИО.

Условия подобия

Геометрическое подобие сводилось к условию равенства единице геометрического масштаба за счет соблюдения равенства размеров волновода, обрабатываемой емкости и активной зоны МГД-установки для модели и природы. Аналогичным образом обеспечивалось равенство единице масштаба скорости за счет обеспечения равенства линейной скорости прокатки (м/с) в канале МГД-установки природы и модели и равенства скоростей движения торца волновода. Временной масштаб обеспечивался сопоставлением характерных промежутков времени, например времени действия импульса давления при ЭГИО в природе и в модели при одинаковых энергетических параметрах ЭГИО.

Динамическое подобие рассматривалось для каждого из основных гидродинамических критериев подобия.

Число Струхала Sh характеризует инерционные гидродинамические силы, возникающие при нестационарном движении:

$$Sh = L/u_0 t, \quad (1)$$

где L – размеры тел, м; u_0 – характерные скорости тел, м/с; t – характерные промежутки времени, с.

Вышеперечисленные условия моделирования обеспечивали равенство Sh_M и Sh_N . Здесь и далее индексы "Н" и "М" показывают принадлежность к натуре или к модели.

Число Фруда рассматривается при волнообразовании на поверхности, но так как в нашем случае изучались только гидродинамические и акустические процессы в глубине объема расплава, то критерий Фруда не учитывался.

Число Эйлера Eu учитывает соотношение сил давления и сил инерции. Для безотрывного движения оно не является определяющим. В случае же возникновения кавитационных процессов его можно свести к числу кавитации α [8, 10]:

$$\alpha = 2 \frac{P_\infty - P_{II}}{P_a}, \quad (2)$$

где P_∞ – статическое давление невозмущенной среды; P_{II} – давление внутри кавитационного пузырька; P_a – давление звуковой волны.

Соответствие P_∞ для модели и природы принималось в виде $P_{\infty N} = P_{\infty M}$.

Величина P_{II} для воды определяется давлением насыщенного пара [10], а для природы – газовым давлением, которое на порядки может превышать давление насыщенного пара. Поэтому сопоставление величин давлений в пузырьке, который находится в воде и расплаве, на наш взгляд, является дискуссионной проблемой. Акустическое давление определяется соотношением

$$P_a = \rho C u_0, \quad (3)$$

где ρ – плотность среды; C – скорость звука.

При равенстве скоростей движения поршня u_M и u_N обеспечить равенство акустических жесткостей ρC модельной и натурной жидкостей технически невозможно. Таким образом, обеспечить равенство α_M и α_N при геометрических и временных масштабах, равных единице, также невозможно.

Число Вебера We – отношение сил поверхностного натяжения к силам инерции, которое определяют в случае изучения динамики струй, брызг, капиллярных процессов и образования каверн, равняется:

$$We = \sigma/(\rho u_0^2 L), \quad (4)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе жидкость-газ.

Так как геометрический масштаб равен единице, то вышеперечисленные условия обеспечивали равенство $We_M = We_N$.

Равенство чисел Рейнольдса Re в нашем случае обеспечивалось равенством динамических вязкостей модели и природы $\eta_M = \eta_N$ в соотношении

$$Re = \frac{u \rho D}{\eta}, \quad (5)$$

где D – диаметр канала МГД-установки; u – скорость перемещения жидкости.

Добавим, что гидродинамическая обстановка в объеме расплава удовлетворяла условию $M < 1$, где M – число Маха.

Для соблюдения упомянутых критериев подобия проанализированы соотношения следующих показателей свойств природы и модели: динамической вязкости, плотности, поверхностного натяжения. Для металлических расплавов значения этих свойств выбраны при температуре плавления по [10–14] (табл. 1) и в расчетах использовались их средние значения.

Для воды эти же свойства приведены в табл. 2.

Таблица 1. Физические свойства натуральных сплавов вблизи точки плавления

Сплав	ρ , кг/м ³	η , мН с/м ²	σ , Дж/м ²	σ/ρ , м ³ /с ²
Сплавы на основе железа	$\frac{6600 \div 8170}{7390}$	$\frac{3,8 \div 6,3}{5,15}$	$\frac{1,65 \div 1,90}{1,78}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Сплавы на основе алюминия	$\frac{2380 \div 2410}{2400}$	$\frac{1,0 \div 1,8}{1,4}$	$\frac{0,85 \div 0,95}{0,9}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$
Чистый алюминий	2386	1,3	0,914	$3,8 \cdot 10^{-4}$
Чистое железо	7050	5,4	1,856	$2,6 \cdot 10^{-4}$

Примечание. Над чертой – разбег справочных данных, под чертой – среднее значение.

Таблица 2. Физические свойства воды при различных температурах

t , °С	20	30	40	50	60	80
ρ , кг/м ³	0,9982	0,9952	0,9922	0,9902	0,9882	0,9718
η , мН с/м ²	1004	829	655	562	470	357
σ , Дж/м ²	72,58	70,99	69,41	67,72	66,04	62,50

Таким образом, данные, приведенные в табл. 1 и 2, показывают, что при условии равенства единице масштабов геометрии, времени и скорости для воды, подогретой в интервале температур 35–60°С, и расплава вблизи точки плавления удовлетворяются равенства чисел Re , Sh , We . При этом обеспечить равенство числа E_u не представляется возможным. То есть полного динамического подобия при выбранных условиях моделирования добиться нельзя.

Результаты эксперимента по первому этапу исследований и их обсуждение

В составе экспериментального стенда для моделирования физических процессов в расплаве при ЭГИО ковш с расплавом заменили прозрачной камерой, заполненной водой (рис. 2, 3). Использовались волноводы диаметрами 50 и 20 мм с приваренными на торце насадками различного диаметра и двумя насадками, разнесенными на величину их диаметра. Варьировали расстояние от торца волновода до дна камеры. Для получения более полной картины происходящих во время ЭГИО процессов обработку проводили сначала на чистой воде, затем на дно камеры помещали песок, частички шамота и подкрашивали жидкость. Задавались $W_0 = 1,25$ кДж, $f = 1,5$ Гц, время обработки составляло 1 мин. Отснятый с помощью видеокамеры материал оцифровывался программой DrDivX11 и изучался покадровым просмотром с помощью программы Light Alloy 2.9.

Результаты экспериментальных исследований по первому этапу показали, что насадка на торце волновода существенно активизирует кавитационные процессы и макротечения, максимальный уровень которых соответствует соотношению диаметра насадки и диаметра волновода $\sim 2,5$. Характерное движение жидкости при одиночном импульсе показано на рис. 2. Можно наблюдать, как сформированное в результате поданного импульса кавитационное облако (рис. 2,а) выбрасывается ко дну обрабатываемой емкости (рис. 2,б,в). Через время $\sim 0,6$ с кавитационное облако начинает распадаться (рис. 2,г).



а



б



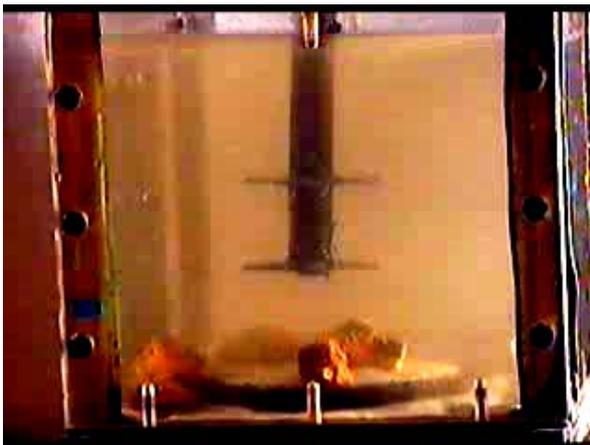
в



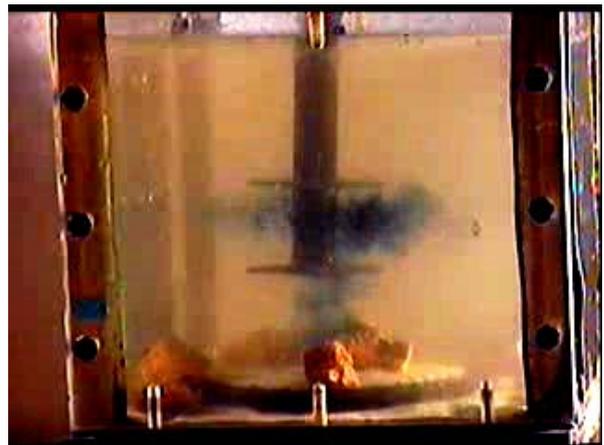
г

Рис. 2. Физические процессы в модельной жидкости при ЭГИО (динамика одиночного импульса): а – 0,05; б – 0,25; в – 0,5; г – 0,6 с

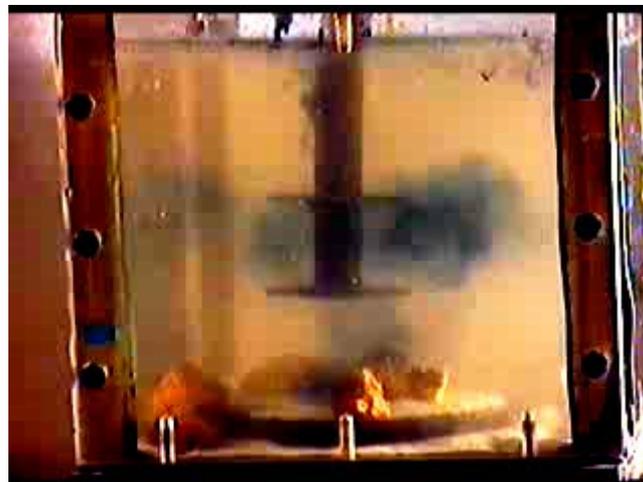
Подкрашивание воды позволило оценить скорость течений от торца волновода ко дну камеры и установить, что явно выраженные турбулентные течения возникают между двумя насадками, разнесенными на величину их диаметра. Над верхней и под нижней насадками с некоторой разницей во времени возникают интенсивные кавитационные зоны, состоящие из крупных пузырьков диаметром до несколько миллиметров. Причем при первом же импульсе от зоны насадок наблюдается интенсивное "выбрасывание" подкрашенной жидкости ко дну и в стороны (рис. 3) со скоростью порядка 0,25 м/с. Дальнейшее перемещение фронта подкрашенной жидкости происходит со скоростью 0,05 м/с.



а



б



в

Рис. 3. Характерное "выбрасывание" подкрашенной жидкости при ЭГИО: а – 0; б – 2; в – 4 с

Для частоты следования импульсов $f = 2$ Гц время полного помутнения обрабатываемого объема с водой не превышало 30 с. Оценить время перемешивания металлической жидкости, заполняющей металлургическую емкость того же объема, можно, используя соотношение

$$m = \frac{\pi d^2}{4} \rho u, \quad (6)$$

где m – масса воды в камере; d – характерный размер емкости.

Учитывая масштабы подобия, можно подсчитать, что металлический расплав с объемом, равным объему модельной жидкости, будет перемешиваться за время, превышающее 30 с в ρ_H/ρ_M раз. Таким образом, расплав алюминиевого сплава будет перемешиваться за 72 с, а железоуглеродистого сплава – за 210 с. Увеличение частоты следования импульсов пропорционально уменьшит это время.

С помощью песка и шамота, помещенных на дно камеры, оценивали глубину, на которую распространяется электрогидроимпульсное воздействие. Визуальное наблюдение показало, что явно выраженное кавитационное облако под торцом волновода выбрасывается ко дну камеры со скоростью порядка 0,25 м/с. В песке сразу же после первого импульса начинает образовываться кратер, из кусочков шамота – активно выделяться газ, даже из таких, которые расположены не под волноводом. Через несколько импульсов наблюдается их встряхивание по всей площади дна камеры. Это косвенно подтверждает факт постепенного вовлечения всего объема жидкости в процесс течения, а встряхивание кусочков шамота свидетельствует о наличии нестационарных течений.

Из опыта применения ЭГИО в литейном производстве известно, что глубина погружения волновода должна быть таковой, чтобы обрабатывался максимальный объем расплава, но не происходило разрушения днища емкости, например футеровки разливочного ковша. Поэтому в реальном технологическом процессе ЭГИО расплавов глубина погружения волновода выбирается, как правило, равной 1/3 высоты жидкого металла. Металловедческие исследования подтверждают, что при этом эффект воздействия на литую структуру и механические свойства отливок является наилучшим.

Настоящие исследования показали, что при погружении волновода с насадкой на глубину, меньшую 1/3 высоты столба жидкости, наблюдается эффект интенсивного волнообразования на ее поверхности. Кратер в песке практически не образуется, хотя наблюдается нестабильная дегазация кусочков шамота строго под торцом волновода, которые остаются неподвижными. Активное влияние на днище камеры начинается уже при глубине погружения волновода, равной 1/3 столба жидкости. При погружении на глубину 1/2 и более песок через несколько импульсов выстраивается по формам колебаний, характерным для колебаний пластин, что свидетельствует об интенсивном влиянии на днище. Таким образом, подтверждается целесообразность погружения волновода именно на глубину, равную 1/3 высоты столба жидкости в емкости.

Результаты эксперимента по второму этапу исследований и их обсуждение

На втором этапе моделировалась комплексная МГДО + ЭГИО обработка расплава. В составе экспериментального стенда применялась лабораторная установка для ЭГИО и модель МГД-установки, которые обеспечивали полное геометрическое и кинематическое подобие реальных условий. Стенд также содержал систему, регулирующую подачу, циркуляцию и слив жидкости; осветительное и регистрирующее оборудование. Использовали волновод диаметром 20 мм с насадкой. Применялись 3 из 9 исследованных ранее в работе [3] схем комплексной обработки (рис. 4), которые обеспечивали существенно разные изменения структуры и свойств литого металла. Варьировали скорость прокачки жидкости в модельном МГД-устройстве G , запасаемую энергию W_0 и частоту следования импульсов f (табл. 3). При необходимости для лучшей визуализации происходящих при обработке процессов использовали подкрашенную жидкость.

О процессах, которые происходят в жидкости при комплексной обработке по схеме А "МГД нагнетание + ЭГИО", можно судить по рис. 5,а. При ЭГИО в модельном МГД-устройстве по этой схеме с каждым импульсом появляется облачко кавитационных пузырьков под и над насадками волновода. Наибольшее облачко ($\sim 40 \text{ см}^3$) возникает под торцом волновода. Возникшие пузырьки выносятся вверх потоком из канала. На торце волновода с насадкой, вдоль волновода, в районе стенок центрального канала МГД-установки после каждого разряда возникают вихри жидкости. Возможно, это проявление взаимодействия гидродинамических течений в МГД-установке с конвективными течениями, которые вызваны импульсным воздействием ЭГИО. С увеличением скорости прокачки с 0,068 до 0,21 л/с пузырьки быстрее выносятся из центрального канала МГД-установки, вихри жидкости возникают независимо от значений G и объем зоны кавитационных пузырьков несколько уменьшается (рис. 6,а).

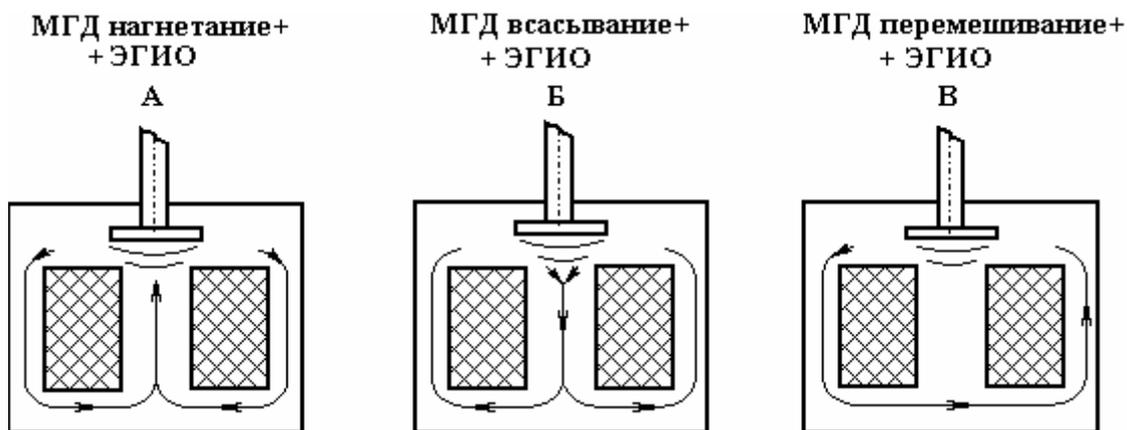


Рис. 4. Схемы комплексной обработки расплава (стрелкой показано направление движения жидкости)

Таблица 3. Параметры комплексной обработки МГДО + ЭГИО

Варьируемый параметр	№ эксперимента			
	1	2	3	4
G , л/с	0,068–0,21	0,17	0,17	0,17
f , Гц	1,5	1,5÷8	1,5	1,5
W_0 , кДж	1,1	1,1	0,6–1,6	1,6
Схема комплексной обработки	А	А	А	А, Б, В

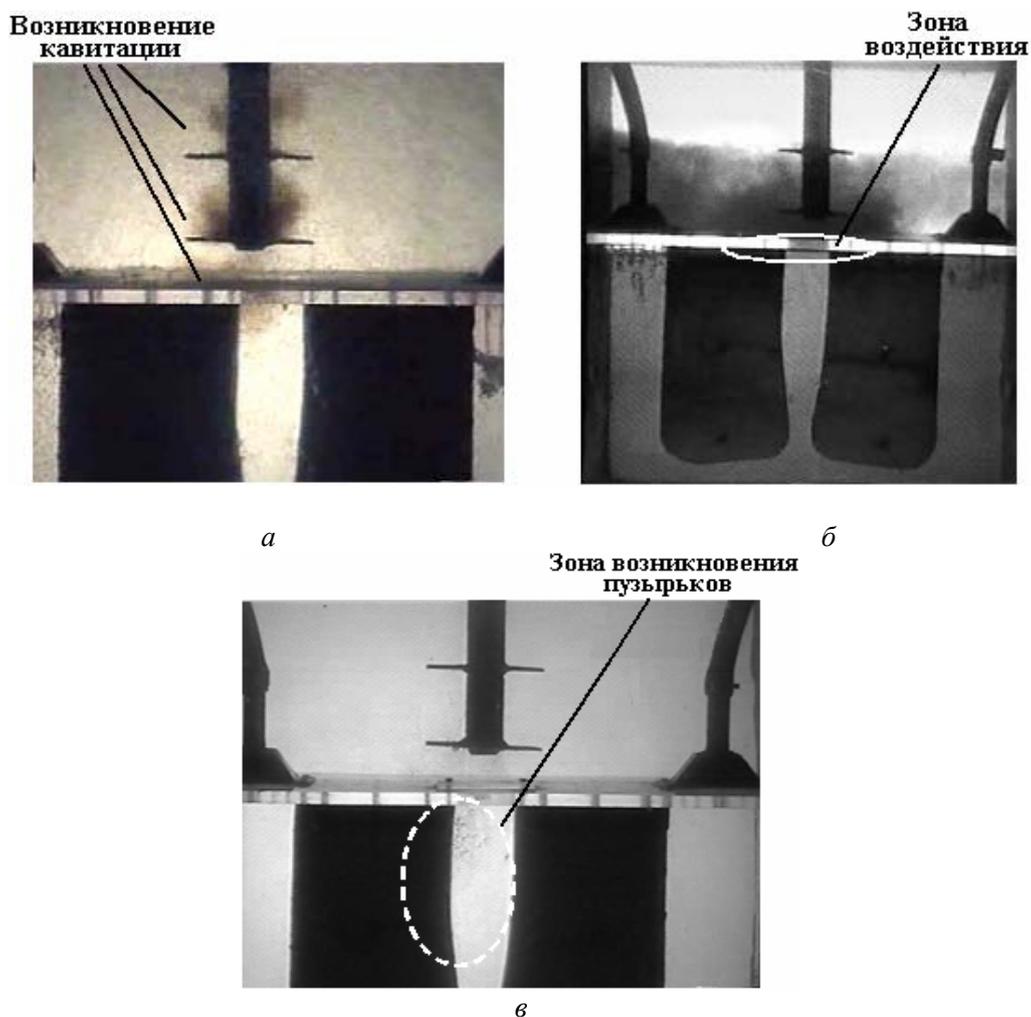
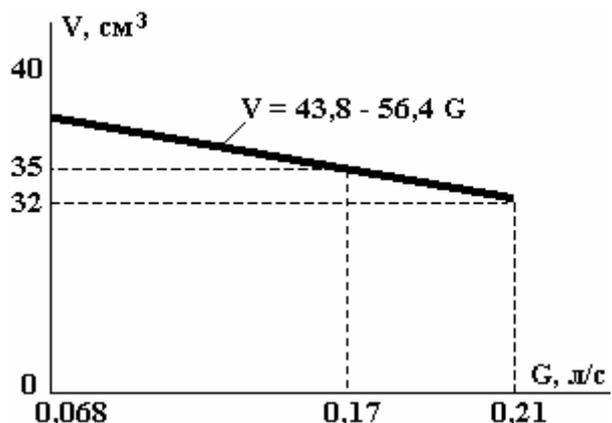
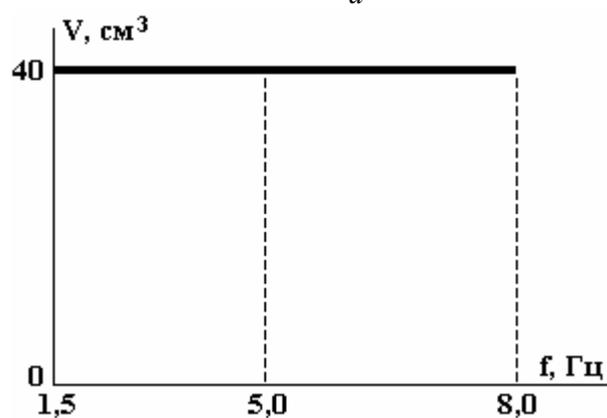


Рис. 5. Комплексная обработка (МГДО + ЭГИО) модельной жидкости

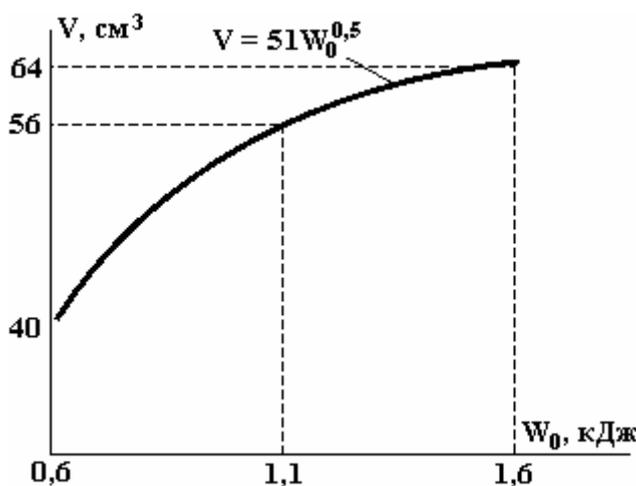
При повышении частоты f с 1,5 до 8 Гц уменьшаются размеры пузырьков, но объем зоны кавитационных пузырьков от f не зависит (рис. 6,б).



a



б



в

Рис. 6. Зависимость объема зоны кавитации: а – от скорости прокатки; б – от частоты следования импульсов; в – от запасаемой энергии единичного импульса (схема А)

С увеличением энергии импульса W_0 объем зоны возникновения кавитационных пузырьков увеличивается пропорционально $\sqrt{W_0}$ (рис. 6,в). Подкрашивание жидкости показало, что с приближением фронта подкрашивающей жидкости к торцу волновода под ним создается темная зона (рис. 5,б). Возможно, это связано с повышением концентрации краски либо с наличием какого-то оптического эффекта (вихря, области повышенного давления). Со временем цвет жидкости в камере выравнивается, в зоне под торцом волновода после каждого импульса вода темнеет только короткое

время. Время перемешивания для воды при ЭГИО в модельной МГД-установке составило 7 с. Учитывая масштабы подобия, можно подсчитать, что алюминиевый расплав того же объема перемешается за 17 с, а железоуглеродистый расплав – за 49 с.

При обработке по схеме Б "МГД всасывание + ЭГИО" с каждым импульсом происходит обильное газовыделение, образование значительного количества пузырьков, в том числе большого диаметра (до 5 мм). Основное количество пузырьков находится в центральном канале МГД-установки (рис. 5,в). Но их всплытия не наблюдается, так как для этого газовому пузырьку необходимо двигаться против гидродинамического течения. Тем самым условия для дегазации обрабатываемой жидкости не создаются. С увеличением частоты гидродинамическая картина качественно мало изменяется, но добавляется явно выраженная вибрация центрального канала.

При обработке по схеме В "МГД перемешивание + ЭГИО" с каждым подаваемым импульсом появляется облачко кавитационных пузырьков под и над насадками волновода, наибольшее облачко образуется под торцом волновода. Часть возникших пузырьков попадает в центральный канал или возникает в нем, но тут же всплывает и уносится потоком в направлении циркуляции жидкости. Каждый импульс вызывает вихри в воде под торцом волновода и в центральном канале. С увеличением частоты от 1,5 до 8 Гц картина качественно не изменяется, увеличивается только интенсивность образования кавитационных пузырьков.

Таким образом, сопоставление результатов по схемам А, Б, В показывает, что направление прокачки существенно влияет на процессы, приводящие к изменению структуры и свойств жидкости. Обработка по схеме А приводит к образованию более мелких пузырьков, чем по схемам Б и В. Вероятность схлопывания мелких пузырьков гораздо выше, чем крупных. Следовательно, во время обработки по этой схеме можно реализовать интенсивный процесс схлопывания пузырьков с генерацией в близлежащую микрону расплава высоких давлений. А это, как отмечается в работе [4], способствует локальному переохлаждению расплава, дополнительному зародышеобразованию при кристаллизации и, в конечном итоге, измельчению литой структуры. Обработка по схемам Б и В позволяет "накачать" газом пузырьки до более крупных размеров. Значит, здесь более вероятен эффект газоудаления и возможность получения большей плотности отливок. Результаты металлургических исследований [3, 7] это подтверждают. Для того, чтобы дать возможность газовым пузырькам всплывать на поверхность расплава при работе по схеме Б, можно дополнительно использовать режим периодического включения МГД-установки.

Выводы

Достичь полного подобия процессов, вплоть до идентичности, при моделировании комплексной ЭГИО + МГДО обработки металлических расплавов на воде или на другой модельной среде нельзя вследствие разнообразия последних и их различной природы.

Вместе с тем можно обеспечить частичное удовлетворение набора основных критериев подобия, что позволяет описывать сценарии протекания процессов в натуре по данным модельных исследований с точностью до их аналогичности.

Качественно оценить происходящие при ЭГИО процессы: возникновение кавитационного облака, перемещение его от торца волновода ко дну емкости со скоростью порядка 0,25 м/с, возникновение гидродинамических течений нестационарного характера (скорость порядка 0,05 м/с) в обрабатываемом объеме.

Оптимальное соотношение диаметров насадки и волновода определено ~ 2,5.

Подтверждена целесообразность погружения волновода при ЭГИО на глубину 1/3 высоты столба жидкости.

Определены зависимости объема возникающих при комплексной МГД и ЭГИО обработке кавитационных зон от технологических параметров обработки: скорости прокачки жидкости, запасаемой энергии и частоты следования импульсов при ЭГИО.

Определены наиболее эффективные схемы комплексной МГДО+ЭГИО обработки (схемы "МГД нагнетание + ЭГИО" и "МГД перемешивание + ЭГИО"), которые обеспечивают максимальную степень дегазации модельной жидкости, что в совокупности с полученными ранее металлургическими результатами дает возможность рекомендовать эти схемы для дальнейшего практического применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Найдек В.Л.* Процессы внеагрегатной обработки металлических расплавов массового использования // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя: Сб. науч. трудов. К., 1998. С. 133–155.

2. 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 магнитодинамической и электрогидроимпульсной обработки алюминиевых сплавов // Процессы литья. 2006. № 3. С. 81–86.
3. Дубоделов В.И., Цуркин В.Н., Грабовый В.М., Середенко В.А., Фикссен В.Н., Гумененко Н.К., Слажнев Н.А., Крептюк Я.В. Многофункциональный технологический модуль как инструмент повышения качества отливок // Литейное производство. 2006. № 6. С. 33–36.
4. Цуркин В.Н., Грабовый В.М., Синчук А.В. Функциональные возможности электрогидроимпульсной обработки расплава в ковше // Электронная обработка материалов. 2006. № 5. С. 55–61.
5. Цуркин В.Н., Синчук А.В., Крептюк Я.В., Дегтев Ю.Н. Исследование кавитационных возмущений в жидком металле, подвергнутом электрогидроимпульсной обработке // Процессы литья. 2007. № 4. С. 9–15.
6. Цуркин В.М., Волков Г.В., Синчук А.В. Вплив електрогідроімпульсної обробки розплаву на елементи різних структурних рівнів в металі // Металознавство та обробка металів. 2004. № 4. С. 37–43.
7. Дубоделов В.И., Грабовый В.М., Середенко В.А., Фикссен В.Н., Цуркин В.Н., Волков Г.В. Технологические возможности внепечной комплексной магнитогидродинамической и электрогидроимпульсной обработки расплава // Процессы литья. 2005. № 3. С. 10 – 16.
8. Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. Учебник. Л., 1982.
9. Декл. пат. № 20685 Украина, МПК В22D 27/08. Способ обработки расплава металла / В.И. Дубоделов, В.М. Грабовый, Н.К. Гумененко, В.А. Середенко, В.Н. Фикссен, В.Н. Цуркин, Я.В. Крептюк, Н.А. Слажнев; Опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Учебное пособие. В 10 т. Т.VI. Гидродинамика. 3-е изд., перераб. М., 1986.
11. Таблицы физических величин. Справочник / Под. ред. И.К. Кикоина. М., 1976.
12. Физическая энциклопедия. Т.1. М., 1988.
13. Физический энциклопедический словарь. Т.1. М., 1960. 588 с.; Т.3. 604 с.
14. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. М., 1979.

Поступила 25.10.2007

Summary

By the method of modelling on transparent liquids physical processes in metallic fusion during electrohidropulse treatment and in complex with magnitodinamic treatment are explored. Size of speed of moving cavitation clouds and speeds of unstationary hydrodynamic streams at electrohidropulse treatment are determined, expedience of immersion of waveguide on the depth of a 1/3 height of liquid column in a tank is confirmed. Dependence of volume of cavitation area from the parameters of complex treatment is set. The charts of complex treatment, which provide the maximal degree of degassing of model liquid, are set.