



УДК 534.143

Поступила 07.12.2016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАВЛЕНИЯ

EXPERIMENTAL STUDY ON THE IMPACT OF KEY PARAMETERS OF MELT MAGNETIC-PULSE TREATMENT ON THE ELECTROMAGNETIC PRESSURE

*В. Н. ЦУРКИН, С. С. ЧЕРЕПОВСКИЙ, Институт импульсных процессов и технологий НАН
Украины, г. Николаев, Украина, пр. Богоявленский, 43а. E-mail: dpta@iippt.com.ua*

*V. N. TSURKIN, S. S. CHEREPOVSKIY, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National
Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine, 43a, Bogoyavlenskiy ave. E-mail: dpta@iippt.com.ua*

Получены экспериментальные данные измерения импульсного давления при осевой магнитно-импульсной обработке расплава на основе алюминия. Показаны зависимости изменения амплитуды электромагнитного давления в расплаве от таких параметров обработки, как амплитуда силы тока в разрядной цепи, частота разрядного тока и расстояние между индуктором и поверхностью расплава.

Experimental data of measuring the pulse pressure in axial magnetic-pulse treatment of aluminum-based melt are obtained. Dependences between the electromagnetic pressure on the melt, amplitude and processing parameters such as the amplitude of current in the discharge circuit, the frequency of the discharge current and the distance between the inductor and the melt surface are shown.

Ключевые слова. Магнитно-импульсная обработка, расплав, электромагнитное давление, алюминий.

Keywords. Pulse magnetic treatment, melt, electromagnetic pressure, aluminum.

Введение

В литейном производстве используют различные методы обработки расплава как в печи, так и вне печного агрегата, в том числе в форме. При этом в расплав вводят различные добавки в малых дозах (модификаторы и флюсы), а также генерируют в расплаве поля различной физической природы. Цель таких обработок – повышение качества литой продукции при минимизации стоимостных затрат.

Осевая магнитно-импульсная обработка (МИО) расплава в технологиях литейного производства начала развиваться не так давно. Этот метод предусматривает импульсное электродинамическое нагружение расплава, размещая над его поверхностью индуктор, в котором генерируются импульсы тока. Публикации по МИО показывают широкие функциональные возможности этого метода и его результативность [1–4].

Следует отметить, что в некоторых работах по МИО расплава применяют источник импульсного тока из оборудования по МИО твердых материалов, что оправдано для пионерных работ в этой области. Но недостаток экспериментальных данных о процессах, сопровождающих такое воздействие на расплав, пока не дает возможности оптимально подойти к проектированию эффективного, стабильного и надежного технологического модуля и предложить рационально организованные соответствующие технологические способы МИО расплава, с помощью которых достигается требуемое соотношение в системе «цена-качество».

Сложные многофункциональные и многофакторные процессы, которые генерируются при различных методах обработки расплава, как правило, не являются изолированными и не всегда могут быть сведены к разрешению чисто вычислительных проблем в модельных представлениях термодинамики, электродинамики, механики и т. п. Здесь успешность решаемой задачи методами вычислительного экс-

перимента определяется на стадии ее постановки, которая должна базироваться прежде всего на данных физического эксперимента. В первую очередь это относится к характеристикам механического воздействия на расплав, вызванного действием электромагнитного поля, генерируемого в скин-слое в объекте обработки при МИО.

Очевидно, только в [5] были представлены данные о разработке и испытании системы измерения импульсного давления в жидком металле при осевой МИО. Авторы работы выделили основные трудности, связанные с такого рода измерениями, состоящие в высокой температуре среды и электрических помехах, исходящих от разрядного контура установки. Чтобы избежать этих проблем, в работе [5] использовали в качестве переходного звена между волноводом и пьезоэлементом камеру с непроводящей, несжимаемой жидкостью (например, керосин). Безусловно, такая конструкция имеет право на существование и обеспечивает по сравнению с традиционной ряд преимуществ, таких, как температуро- и помехозащищенность измерительного контура. В то же время к недостаткам такой измерительной системы можно отнести достаточно высокую степень сложности ее конструкции и эксплуатации, что связано с необходимостью герметизации соединений волноводного датчика и камеры с жидкостью, а также с сложностью расчета камеры с тем, чтобы не допустить искажения акустической волны сжатия на пути к датчику. Анализ зависимостей между параметрами разрядной цепи генератора импульсных токов (ГИТ) и параметрами силового нагружения при МИО позволил бы адекватно перейти к разработке рекомендаций по организации рациональных параметров МИО расплава в технологиях литейного производства, но в анализируемой работе [5] не представлены данные о зависимости величины давления от таких характеристик, как сила тока в индукторе, частота (период) тока и расстояние между поверхностью расплава и индуктором, которые можно определить как ключевые параметры нагружения расплава [6]. Авторами работы [5] показано лишь запаздывание сигнала, который фиксирует записывающая аппаратура, от импульса тока в индукторе, что обусловлено временем прохождения волны сжатия через все составные части системы измерения.

Можно выделить как актуальную следующую цель работы – экспериментально определить зависимость давления в расплаве при его осевой МИО от ключевых параметров воздействия: амплитуды разрядного тока, его частоты (периода) и расстояния между поверхностью расплава и индуктором.

Постановка задачи

При осевой МИО расплава реализуются два сопряженных процесса его нагружения:

- генерирование в контактной зоне «индуктор-расплав» скин-слоя с определенной плотностью электромагнитной энергии, которая, как показано ранее в работе [2], не равномерно распределяется вдоль радиуса поверхности расплава, что вызвано спиральной конструкцией индуктора;
- за счет интегрального действия объемной электромагнитной силы расплав подвергается импульсному механическому воздействию, которое формирует в объеме обработки акустическое поле, распространяющееся от поверхности расплава; кроме того, за счет массивности объекта обработки следует ожидать его низкочастотные колебания (относительно частоты тока), когда вся масса расплава приобретает определенное ускорение.

Как уже отмечалось в работе [5], при измерениях на высоком напряжении и повышенной температуре возникают серьезные технические и метрологические проблемы при конструировании экспериментального стенда, способного регистрировать давление при МИО в жидком металле. По нашему мнению, часть этих проблем можно избежать, если процесс нагружения расплава на основе алюминия промоделировать нагружением массивного твердого алюминиевого цилиндра с длиной и диаметром, удовлетворяющих, в том числе и некоторым метрологическим требованиям. Также цилиндр может быть определен не только как объект обработки при МИО расплава, но и служить волноводным датчиком, если в него встроены соответствующий преобразователь, например, пьезоэлемент. Диаметр волноводного датчика выбран равным диаметру индуктора, а длина должна обеспечивать время прохождения сигнала от пьезоэлемента к противоположному от индуктора концу датчика и обратно не меньшее, чем полупериод разрядного тока. Очевидное преимущество такого датчика заключается прежде всего в возможности его эксплуатации при нормальной температуре.

В данной работе были использованы две конструкции датчика, представляющих собой двухступенчатые цилиндрические волноводы с помещенным между ними пьезоэлементом типа ЦТС-19 толщиной 1 мм. Диаметр такого датчика составлял 60 мм. Для регистрации ускорений две ступени датчика имели длину по 150 мм. Для измерения давлений передний волновод представлял собой пластинку того же ди-

аметра 60 мм, толщиной 6 мм. В случае нагружения первого датчика относительно короткими импульсами массивный передний волновод выступал в качестве механического фильтра для высокочастотного акустического сигнала. В результате этого регистрировался колебательный процесс для массивного тела на жесткости, которую обеспечивала лавсановая пленка толщиной 50 мкм. Она использовалась для электроизоляции пьезоэлемента от металлических частей датчика.

Сделаем некоторые оценки выбранных параметров датчика давления и ГИТ. Как известно, электро-разрядные процессы могут быть описаны такими параметрами ГИТ, как напряжение на обкладках конденсатора U , его емкость C , индуктивность разрядного контура L . Их выбор для исследований основывался на результатах, полученных как авторами работы [5], так и другими исследователями. В таблице приложены выбранные для измерений варьируемые характеристики разряда и параметры измерительного стенда: максимальное значение амплитуды разрядного тока I_m , емкость конденсаторов ГИТ и величина зазора между индуктором и объектом обработки Δ .

Значение индуктивности для всех номеров экспериментов постоянно и равно $L \approx 2$ мкГн. Периоды колебаний разрядного тока τ для емкостей 1; 5,6 и 100 мкФ равны $\tau = 9; 21; 90$ мкс, что соответствует частотам разрядного тока $f = 11 \cdot 10^4; 4,8 \cdot 10^4; 1,1 \cdot 10^4$ Гц. Заметим, что величины τ и L не изменялись в экспериментах для всех величин промежутка Δ .

Характеристики разрядного контура

Номер серии	Номер эксперимента	I_m , А	Δ , мм	C , мкФ
1	1.1	8000	0,001	1
			1	
	1.2		3	
	1.3		5	
	1.4		7	
	1.5		9	
2	2.1	1500	3	1
	2.2	3500		
	2.3	7500		
	2.4	8000		
	2.5	12000		
3	3.1	8000	1	1
	4.1			5,6
	5.1			100

Каждая серия экспериментов была направлена на исследование определенной зависимости:

- 1) зависимость давления на заготовку при МИО от зазора между индуктором и объектом обработки;
- 2) зависимость давления на заготовку при МИО от амплитуды силы тока в разрядном контуре установки МИО;

3) зависимость между емкостью батареи конденсаторов ГИТ и давлением на заготовку при МИО.

Максимальное значение величины первого полупериода разрядного тока при $C = 100$ мкФ составляло значение $\tau_{0,5} \approx \pi\sqrt{LC} \approx 45$ мкс. Время прихода прошедшего и отраженного сигнала от «дна» волновода датчика к пьезоэлементу составляло величину $\tau_{отр} \approx 60$ мкс.

Таким образом, выбранная длина ненагружаемого напрямую волновода 150 мм позволяла даже при самых длительных из принятых в работе периодах тока регистрировать первую, основную полуволну давления без искажений.

Толщина скин-слоя при выбранных параметрах разрядного контура при максимальном периоде тока 90 мкс и проводимости Al при 20 °С $\gamma = 37,45 \cdot 10^6$ См/м не превышала величину 2 мм. Это оправдывало при измерении давления выбор толщины переднего волновода в 6 мм тем, что давало возможность сформировать в нем акустический сигнал, регистрируемый с помощью пьезоэлемента.

Безусловно, что различные электрофизические и механические характеристики твердого и жидкого состояния алюминия должны вносить некоторую поправку в полученные результаты. Но физика твердого и жидкого состояний для анализируемых в работе характеристик, полученных при измерениях, позволяет утверждать, что механизмы процессов формирования скин-слоя, механического нагружения и распространения акустических сигналов здесь могут быть приняты одинаковыми. Разница будет только в числовых показаниях измеряемых физических величин при одинаковых параметрах разряда. Для

акустического сигнала сравнение величины акустической жесткости твердого и жидкого состояний (ρc , где ρ – плотность, c – скорость звука) показывают соответствующие их значения $13,7 \cdot 10^6$ и $11,2 \cdot 10^6$ Па·с/м, т. е. за счет этого величина амплитуды давления в жидком алюминии будет примерно на 20% меньше, чем получена в измерениях.

Амплитудные значения электродинамической силы, нагружающей расплав, определяются плотностью электромагнитной энергии в скин-слое, объем которого отличается для жидкого и твердого состояний за счет разной его толщины, в 3 раза. Это позволяет предположить, что регистрируемые в эксперименте амплитуды давлений в твердом состоянии ожидаются минимум в 3 раза большими, чем в жидком металле.

Пересчет численных значений давления, полученных на твердотельном датчике к жидкому состоянию, является предметом другой задачи. Но качественные результаты изменений, по нашему мнению, в этих случаях должны быть аналогичны. Поэтому далее представлены полученные результаты в относительных единицах.

Описание экспериментального стенда и методические особенности измерений

Экспериментальный стенд состоит из двух блоков: высоковольтного электроразрядного и низковольтного измерительного (рис. 1). Возникающие при этом проблемы нивелирования наводок в измерительных цепях (тока, напряжения, давления) решались классическими методами, хорошо описанными в литературных источниках применительно к измерениям на высоком напряжении [6, 7]. Использование низкочастотного фильтра (НЧФ) вызвано необходимостью устранения паразитной составляющей сигнала, природа которой определяется высокочастотными гармониками импульсных процессов различной физической природы. Частично, как описано выше, проблема избавления от некоторых помех анализируемых сигналов решилась конструкцией датчика.

Эксперимент проводили согласно следующей последовательности операций:

1. Устанавливались параметры зарядной и разрядной цепи ГИТ (разрядный ток, зарядное напряжение и емкость батареи конденсаторов).
2. Под горизонтально расположенный плоский индуктор устанавливался датчик в вертикальном положении.
3. Индуктор подводился к верхнему торцу датчика.
4. С помощью электроизолирующей прокладки заданной толщины выставлялся зазор (Δ) между индуктором и верхней плоскостью датчика.
5. Производился разряд на индуктор батареи конденсаторов, заряженной до заданного напряжения.
6. Сигнал с пьезоэлемента фиксировался запоминающим осциллографом W2012 производства Wittig Technologies.
7. Данные с осциллографа переносились на персональный компьютер для дальнейшего анализа.
8. Регистрировались осциллограммы разрядного тока для каждого номера эксперимента.

Схемная реализация высоковольтного комплекса выполнена с учетом разработки на ее базе мобильного, экономичного, малогабаритного ГИТ, аналогичного описанному в работе [8] (рис. 1).

В качестве датчика тока использовали пояс Роговского (ПР); для регистрации и контроля процессов заряда-разряда конденсаторной батареи – омический делитель Д1 ($K_d = 1:2500$), разработанные и изготовленные в ИИПТ НАН Украины.

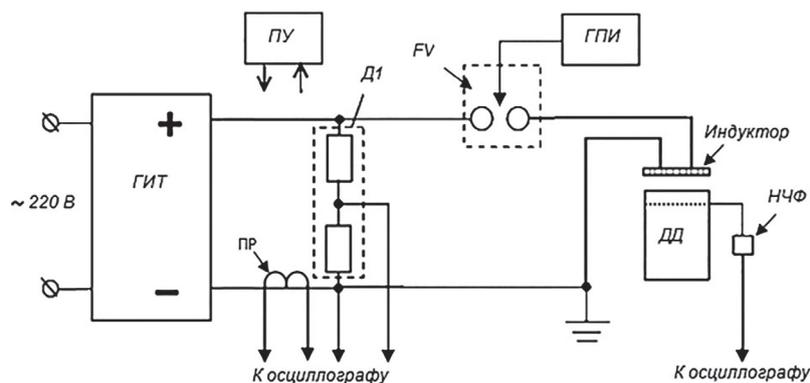


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

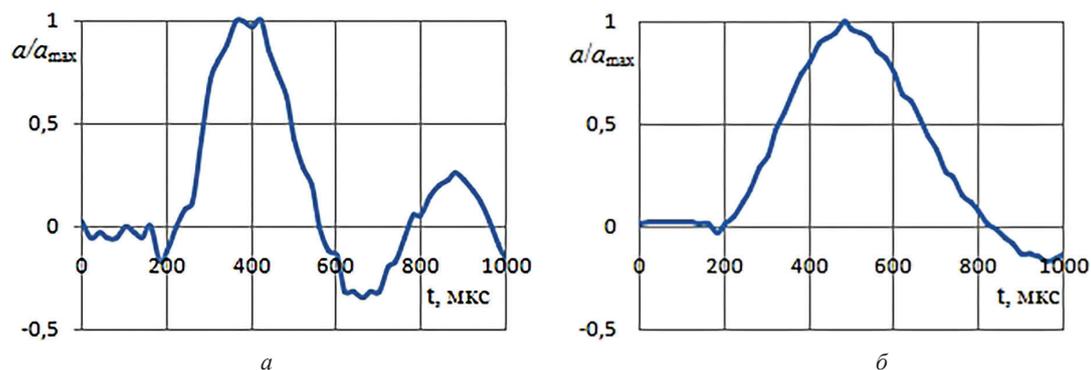


Рис. 2. Характерные осциллограммы зависимости ускорений массы датчика от времени: а – при $\Delta = 7$ мм; б – при $\Delta = 0,1$ мм

Основная часть генератора импульсных токов была смонтирована в экранированной комнате. Индукторная система была вынесена за ее пределы и расположена на экспериментальном участке в непосредственной близости от датчика давления. С целью снижения индуктивности разрядного контура емкостной накопитель и коммутатор были соединены двумя параллельно соединенными коаксиальными кабелями РК50-11-11. Секция автоматики расположена в выносном щите-пульте управления ПУ, который соединен с ГИТ многожильным экранированным кабелем для передачи сигналов управления, индикации, контроля и заземления пульта (рис. 1).

Для каждого номера экспериментов (см. таблицу) выполнялось по пять разрядов для определения статистической погрешности, которая для зависимости разрядного тока не превышала 5%, для давления – 20%.

Обсуждение результатов

На рис. 2 представлены характерные осциллограммы зависимости ускорений массы датчика от времени. Здесь период низкочастотных колебаний датчика относительно периода тока позволяет утверждать о том, что это может быть только временная зависимость ускорения, а не давления, для которого период колебаний сигнала должен иметь порядок периода колебаний тока.

Можно предположить, что при зазоре $\Delta \approx 0,01$ мм индуктор демпфирует эти колебания, поэтому сигнал ограничен одной полуволной.

На рис. 3 сопоставлены осциллограммы разрядного тока и давления для трех выбранных величин емкости (С). Здесь период давления уже согласован с периодом тока в отличие от сигнала, показывающего временную зависимость ускорения (см. рис. 2). Заметим, что с увеличением периода тока разряда от режима, близкого к режиму короткого замыкания, до почти согласованного, максимальное значение давления по времени отстает от амплитуды первого полупериода тока, тем активней, чем меньше период тока.

Результаты 1-й серии экспериментов (см. таблицу), направленной на изучение зависимости давления на датчик при МИО от промежутка между индуктором и расплавом, представлены на рис. 4. Эти данные показывают пологое падение величины электромагнитного давления с увеличением зазора между индуктором и заготовкой до величины $\Delta = 3$ мм. Далее наблюдается незначительное уменьшение значения давления с ростом Δ . Таким образом, при МИО расплава рекомендуется устанавливать величину зазора Δ не более 3 мм.

Результаты 2-й серии экспериментов (см. таблицу), направленной на изучение зависимости давления при МИО от амплитуды разрядного тока в индукторе, приведены на рис. 5. Здесь значение давления в зависимости от силы тока плавно увеличивается до величины $I_M = 7500$ А, после чего идет более резкое увеличение давления, что позволяет говорить о целесообразности использования разрядных токов с максимальным значением 7500 А и выше.

Результаты 3-й серии экспериментов (см. таблицу), направленной на изучение зависимости давления на датчик при МИО от частоты разрядного тока в индукторе, представлены на рис. 6. Ход этой кривой требует отдельных пояснений. Ранее полученная нами численная зависимость $P = f(f)$ [9] монотонно возрастала с ростом частоты тока и не имела минимума как на рис. 6. Очевидно, что модельные представления работы [9] не учитывали каких-то характерных особенностей спектральных плотностей нагрузки и собственных колебаний объекта нагружения, как сделано, например, в работе [10], где анализи-

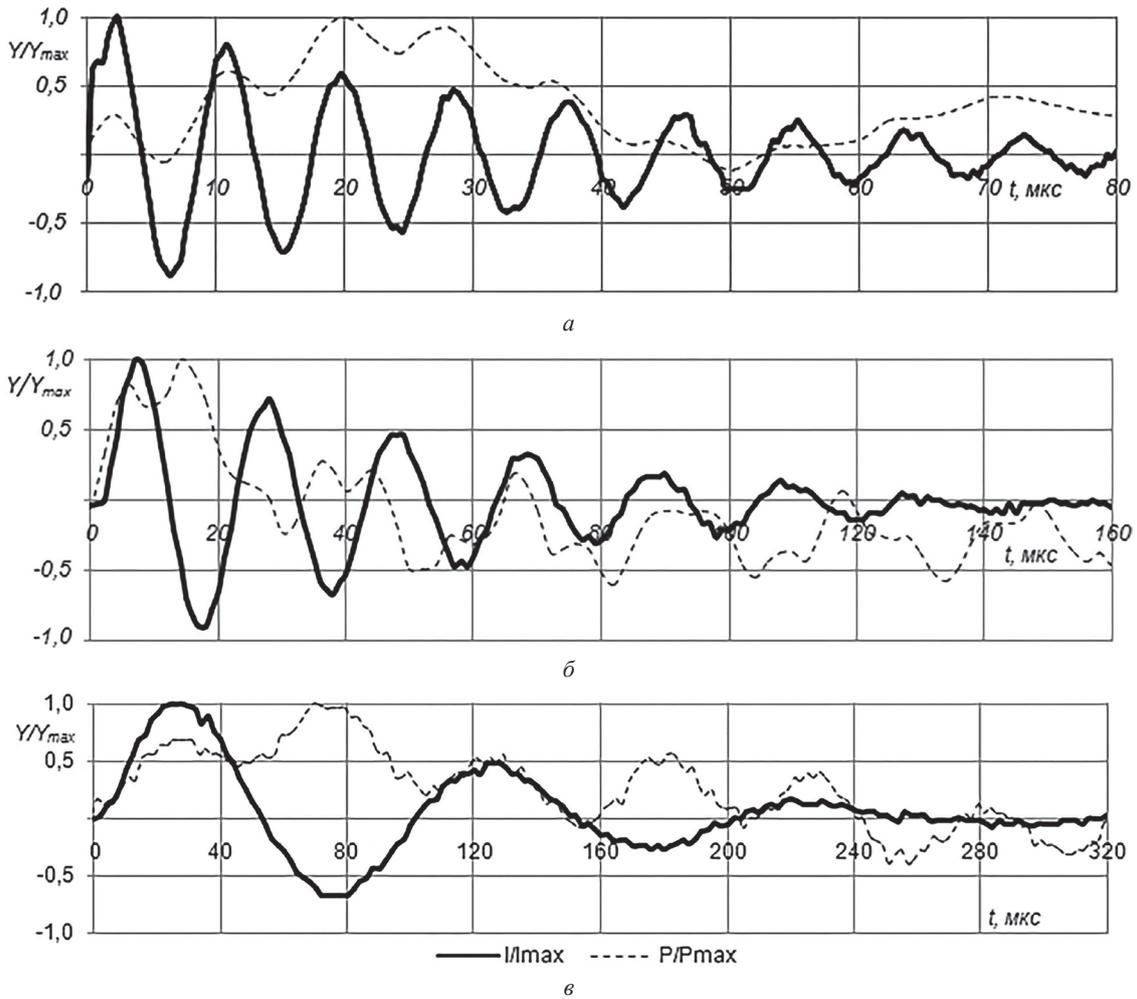


Рис. 3. Сопоставление импульса тока в индукторе и давления на заготовку при МИО: а – 1 мкФ; б – 5,6; в – 100 мкФ

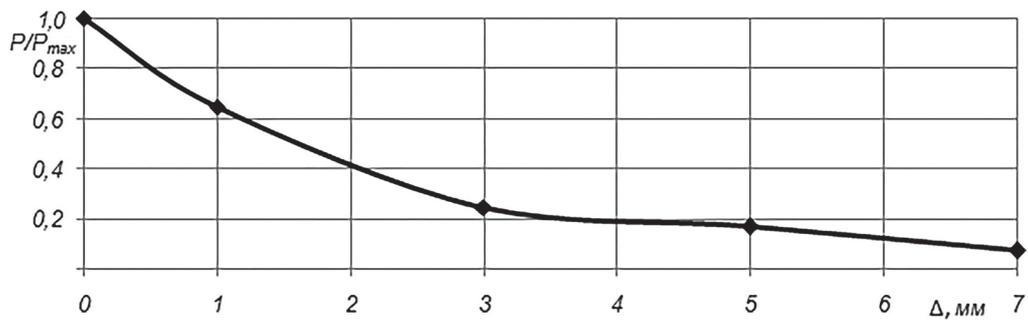


Рис. 4. Зависимость амплитуды давления при МИО от зазора между индуктором и заготовкой

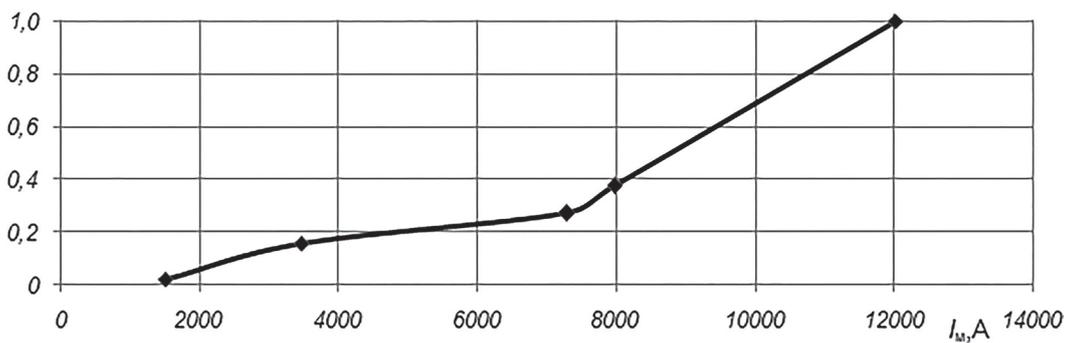


Рис. 5. Зависимость амплитуды давления при МИО от амплитуды разрядного тока

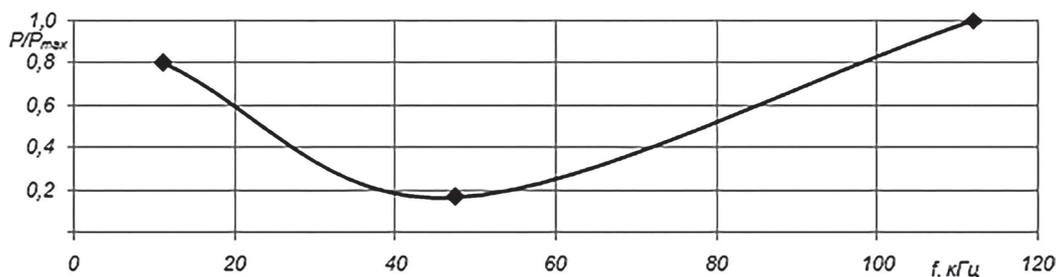


Рис. 6. Зависимость амплитуды давления при МИО от частоты разрядного тока

ровались электромагнитные процессы в расплавах и показано при более точной постановке численной задачи наличие экстремумов на кривых «скорость-частота тока», «деформация твердой корочки – частота тока». Таким образом, можно считать, что рис. 6 показывает более реальную зависимость давления от частоты разрядного тока при МИО расплава, чем данные работы [9].

Выводы

В результате экспериментальных измерений импульсного давления при МИО были получены качественные зависимости: амплитуды давления от зазора между индуктором и заготовкой, от силы тока в индукторе и частоты разрядного тока в разрядной цепи установки. Их анализ подтверждает ранее полученные различными исследователями выводы о том, что интенсивность силового воздействия на объект обработки растет с уменьшением расстояния между индуктором и заготовкой, а также с ростом амплитуды силы тока в индукторе. Но представленные в работе результаты показывают, что наиболее рационально устанавливать $\Delta \leq 3$ мм, а $I_M > 7500$ А.

Важным с точки зрения авторов является результат, полученный при исследовании зависимости амплитуды давления при МИО от частоты тока в разрядном контуре. Из рис. 6 видно, что интенсивность силового воздействия имеет минимум при частоте разрядного тока в индукторе 50 кГц, создавая своеобразный провал. Таким образом, можно судить о том, что при проектировании установки, направленной на формирование максимального силового воздействия на объект обработки, необходимо выбирать частоты разрядного тока или от 1 до 10 или от 100 кГц и выше. Заметим, что высокочастотный вариант ГИТ позволяет минимизировать энергозатраты на обработку [9].

В работе впервые относительно МИО расплава получены экспериментальные данные, показывающие, что массивный объект обработки при импульсном нагружении совершает низкочастотные (относительно частоты колебаний тока) колебания на жесткости, определяемой формой. При этом амплитуда таких колебаний тем больше, чем больше частота тока. Этот эффект существенно отличает отмеченные процессы в объекте обработки от процессов при магнитно-импульсной штамповке. Особенности таких колебаний требуют дополнительных исследований.

Литература

1. **Bo Li.** Effect of temperature field on solidification structure of pure Al under pulse magneto-oscillation / Bo Li., Yin Zhenxing., Yong Youngyoung et al. // China foundry. 1988. Vol. 8(2). P. 172–176.
2. **Синчук А. В.** Силовое магнитно-импульсное воздействие на твердо-жидкий алюминиевый сплав А357 / А. В. Синчук, В. Н. Цуркин, А. В. Иванов [и др.] // Процессы литья. 2012. № 5. С. 43–53.
3. **Чугунный Е. Г.** Магнитно-импульсная обработка кристаллизующихся расплавов / Е. Г. Чугунный // Литейное производство. 1996. № 1. С. 12–14.
4. **Pe Ning.** Mechanism of pulse magneto-oscillation grain refinement on pure Al/ Ning Pei, Gong Yongyong, Li Renxing [et al.] // China foundry. 2011. Vol. 8(1). P. 41–50.
5. **Юсупов Р. Ю.** Измерение импульсных давлений в объеме расплава в условиях интенсивных импульсных помех / Р. Ю. Юсупов, Е. Е. Кострюков // Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2012. № 5–2(36). С. 257–262.
6. **Цуркин В. Н.** Исследование характеристик плазмы электроразряда в воде/В. Н. Цуркин, И. С. Швец // ТВТ. 1987. Т. 25, № 2. С. 235–240.
7. **Шваб А.** Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.
8. **Щерба А. А.** Электротехнические компактные системы обработки расплавов металлов высоковольтными электроразрядными импульсами / А. А. Щерба, А. В. Иванов // Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2014. Вип. 36. С. 96–102.
9. **Череповский С. С.** Управляющие параметры магнитно-импульсной обработки расплава / С. С. Череповский // Металл и литье Украины. 2014. №12. С. 32–33.

10. Подольцев А. Д. Элементы теории и численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах/А. Д. Подольцев, И. Д. Кучерявая. Киев: Изд-во Института электродинамики НАН Украины. 1999. 363 с.

References

1. **Bo Li, Yin Zhenxing**, Yong Youngyoung et al. Effect of temperature field on solidification structure of pure Al under pulse magneto-oscillation. *China foundry*. 1988. Vol. 8(2), pp. 172–176.
2. **Sinchuk A. V., Tsurkin V. M., Ivanov A. V. et al.** Force magnetic pulse action on the solid-liquid A357 aluminum alloy. *Processy lit'ja = Processes of foundry*, 2012, no. 5, pp. 43–53 (In Russian).
3. **Chugunnyj E. G.** Pulse magnetic treatment of crystallizing melts. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1996, no. 1, pp. 12–14 (In Russian).
4. **Pe Ning**. Mechanism of pulse magneto-oscillation grain refinement on pure Al/ Ning Pei, Gong Yongyong, Li Renxing et al. *China foundry*, 2011, vol. 8(1), pp. 41–50.
5. **Jusupov R. Ju., Kostrjukov E. E.** Measuring the pulse pressure in the melt volume in conditions of intense pulse interference. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ajerokosmicheskaja tehnika, tehnologii i mashinostroenie*, 2012, no. 5–2(36), pp. 257–262 (In Russian).
6. **Tsurkin V. N., Shvec I. S.** Research of electric discharge plasma characteristics in water. *High Temperature*, 1987, vol. 25, no. 2, pp. 235–240 (In Russian).
7. **Schwab A.** High-voltage measurements: Measuring instruments and measurement techniques. 2 nd ed., Revised. and supplement-ed., Heidelberg, 1971 (Russ. ed. Kuzhekina I. P. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1983, 264 p.).
8. **Szczerba A. A., A. V. Ivanov.** Electrotechnical compact systems of molten metal treatment with high-voltage electric-pulse. *Works of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine*, 2014. no. 36, pp. 96–102 (In Russian).
9. **Cherepovskiy S. S.** The control parameters of magnetic-pulse treatment of melt. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2014, no. 12, pp. 32–33 (In Russian).
10. **Podoltsev A. D., Kucheryavaya I. D.** *Elements of the theory and numerical calculation of electromagnetic processes in conducting environments*. Kyiv, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine Publ., 1999, 363 p. (In Russian).