

УДК 621.74

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ РАСПЛАВОВ

© 2014 Д.Г.Черников¹, В.А.Глущенков¹, В.И.Никитин², К.В.Никитин²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

²Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 07.08.2013

В данной статье представлены результаты исследования влияния параметров магнитно-импульсной обработки расплавов на структуру и механические свойства сплавов АК6М2, а также на продолжительность сохранения эффектов от такой обработки. При этом рассмотрены две схемы магнитно-импульсного воздействия на расплав – радиальная и осевая.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, силумин, расплав, технологические схемы воздействия, микроструктура, механические свойства, качество

В настоящее время с целью повышения качества отливок активно разрабатываются новые способы обработки расплавов, в том числе различные способы физического воздействия.

Известен ряд внешних электромагнитных способов воздействий на жидкые металлические расплавы, например, облучение расплавов наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) [1], электрогидроимпульсная (ЭГИО) обработка [2]. В работах [3-6] было показано положительное влияние магнитно-импульсной обработки (МИО) жидкых силуминов на структуру и свойства литых сплавов.

В данной статье представлены результаты исследований по влиянию энергии разряда (W, кДж) и количества импульсов (n, шт.) при МИО расплавов на структуру и физико-механические свойства промышленного силумина АК6М2. Дополнительно оценивали длительность сохранения (живучесть) эффекта МИО варьируя временем

выдержки обработанных расплавов. Были опробованы две основные технологические схемы обработки – радиальное и осевое воздействия [4]. Эксперименты проводили в Центре литьевых технологий СамГТУ, а используемое при этом энергетическое оборудование для осуществления МИО создано в НИЛ-41 СГАУ [7]. В качестве генератора импульсного тока применялась универсальная магнитно-импульсная установка МИУ-3.

На первом этапе были проведены эксперименты с использованием радиальной схемы МИО (рис. 1).

К МИУ-3 с помощью соединительного кабеля подключалась технологическая оснастка, состоящая из тепловой камеры, в которую встроен многовитковый индуктор на «обжим» (рис. 1, а). Шихтой для приготовления сплава АК6М2 служил однократный переплав кокильных отходов ОАО «АВТОВАЗ». Расплавы готовили в печи сопротивления, дегазацию и рафинирование не осуществляли, после достижения температуры 760 ± 10 °C расплава с его поверхности снимали шлак, перемешивали, а затем ковшом переливали в предварительно нагретый до 800 °C и помещенный в тепловую камеру тигель. Далее заливали пробы на микроструктуру и производили МИО расплава. После обработки и 5 мин выдержки снова заливали пробы на микроструктуру. На рис. 2 показаны микроструктуры сплава АК6М2, обработанного по разным режимам.

Анализ микроструктуры показывает, что при меньшей энергии, но большем количестве разрядов модифицирующее действие МИО проявляется сильнее: изменяются не только дендриты α -Al, но и эвтектический кремний. Однако, анализ радиальной схемы воздействия выявил ряд существенных технических и технологических

Черников Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогрессивных технологических процессов пластического деформирования, ассистент кафедры обработки металлов давлением. E-mail: 4ernikov82@mail.ru

Глущенков Владимир Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, научный руководитель лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования». E-mail: imtp@ssau.ru

Никитин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Литейные и высокоэффективные технологии». E-mail: tlp@samgtu.ru

Никитин Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии». E-mail: kvn-6411@mail.ru

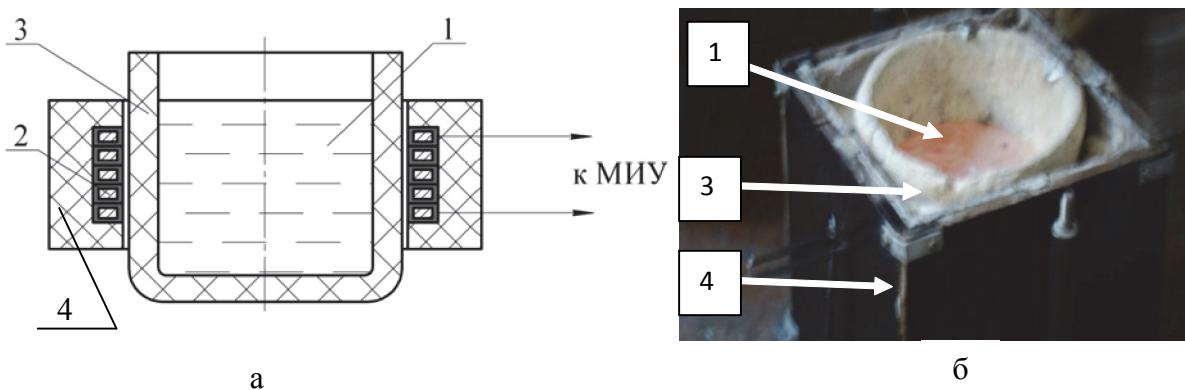


Рис. 1. Радиальная обработка расплавов магнитно-импульсными полями:

а – схема; б – тигель с расплавом в тепловой камере;

1 – расплав; 2 – индуктор; 3 – тигель; 4 – тепловая камера; МИУ – магнитно-импульсная установка

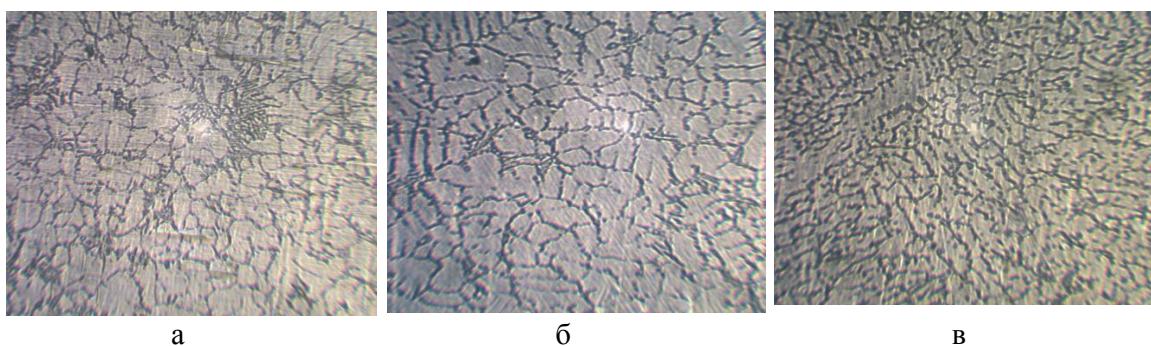


Рис. 2. Влияние магнитно-импульсной обработки расплава

на структуру сплава АК6М2 (увеличение $\times 100$):

а – без обработки; б – МИО при $W=2,0$ кДж, $n=5$ шт.; в – МИО при $W=0,56$ кДж, $n=10$ шт.

недостатков:

- необходимость дополнительного оборудования в виде тепловой камеры;
- предварительный разогрев тигля тепловой камеры для снижения тепловых потерь расплава;
- наличие двух переливов на пути «плавильная печь - тепловая камера - литейная форма».

В связи с этим для дальнейших экспериментов была разработана конструкция и изготовлен индуктор для осевого воздействия импульсными магнитными полями на расплав, находящийся непосредственно в плавильной печи (рис. 3).

На первом этапе, используя отходы медистого силумина, выясняли максимально-возможную энергию разряда, обеспечивающую целостность зеркала расплава и исключение его выбросов. Энергию разряда изменяли, начиная с 0,5 кДж, и далее повышали с шагом 0,2 кДж. В момент разряда наблюдали за состоянием расплава в тигле, после разряда производили осмотр нижней части термозащитного корпуса индуктора. При разрядах в интервале 0,5-1,0 кДж зеркало расплава находилось в спокойном состоянии. Воздействие на расплав энергией 1,5-2,5 кДж вызывало заметное движение зеркала расплава. При этом, раз-

ряды энергией 2,0-2,5 кДж приводили к разрыву поверхности зеркала и выплескам расплава на нижнюю часть термозащитного корпуса. На основании результатов, полученных при радиальной схеме воздействия и проведенного опробования по осевой схеме воздействия, провели обработку расплава АК6М2 разрядами в количестве 10 шт. при энергии разряда 1,5 кДж. В качестве шихты использовал чушковый сплав АК6М2 (стандартная чушка, масса – 17 кг), который в исходном состоянии по параметрам структуры можно отнести к крупнокристаллической шихте. Расплав при температуре $750 \pm 10^{\circ}\text{C}$ подвергали воздействию импульсных магнитных полей. Далее при этой же температуре дегазировали таблетированным препаратом «Дегазер» на основе гексахлорэтана (ТУ 2458-002-79162668) и рафинировали порошкообразным флюсом «ФНК-А» (ТУ 2149-008-43884713) в количествах 0,06% и 0,22% от массы расплава в печи, соответственно. Порядок отбора проб на механические испытания, плотность и металлографическое исследование представлен в табл. 1. Для механических испытаний получали отдельно отлитые в кокиль образцы.

Влияние МИО на физико-механические свойства сплава АК6М2 в литом состоянии пред-



Рис. 3. Обработка расплава импульсными магнитными полями в тигле плавильной печи сопротивления по осевой схеме воздействия:
а – схема осевого воздействия;
б – обработка в тигле плавильной печи;
в – индуктор в термозащитном корпусе
и зеркало расплава после обработки;
1 – расплав; 2 – индуктор; 3 – тигель плавильной печи

Таблица 1. Порядок отбора проб при обработке расплава АК6М2 по осевой схеме воздействия

№ п/п	Описание действий	№ пробы
1	Расплавление, перегрев расплава до $750 \pm 10^{\circ}\text{C}$, съем шлака, перемешивание	1*
2	МИО расплава	-
3	Выдержка после обработки 2 мин	2*
4	Обработка расплава флюсом ФНК-А и дегазером	-
5	Выдержка после обработки 15 мин	3*
6	Повторная обработка расплава магнитно-импульсными полями	-
7	Выдержка после обработки 10 мин	4
8	Выдержка 10 мин	5
9	Выдержка 10 мин	6
10	Выдержка 10 мин	7*
11	Выдержка 10 мин	8

*Заливка отдельно отлитых в кокиль образцов на механические испытания

Таблица 2. Влияние МИО на физико-механические свойства сплава АК6М2 (литое состояние)

№ пробы	Физические свойства		Механические свойства	
	d_s , г/см ³	γ , МСм/м	σ_b , МПа	δ , %
1	2,708	17,4	187,0	5,7
2	2,715	17,8	236,0	7,2
3	2,719	17,8	237,0	7,9
4	2,718	17,8	-	-
5	2,718	17,9	-	-
6	2,719	17,7	-	-
7	2,716	17,6	212,0	7,5
8	2,719	17,7	-	-

ставлены в табл. 2. Из представленных результатов видно, что после обработки расплава магнитно-импульсными полями по осевой схеме воздействия 10 импульсами при энергии разряда 1,5

кДж плотность и электропроводность сплава незначительно увеличиваются с 2,708 до 2,715 г/см³ и с 17,4 до 17,8 МСм/м, соответственно (пробы 1 и 2). После рафинирования, дегазации и повтор-

ного воздействия МИО данные физические свойства стабилизируются и, практически, не меняются. Наиболее существенные изменения отмечены в значениях механических свойств. Так, непосредственно после МИО предел прочности и относительное удлинение увеличились на 26% (проба 2). Последующие рафинирование и дегазация (проба 3) способствовала незначительно росту предела прочности и пластичности сплава по сравнению с расплавом, обработанным импульсными магнитными полями (проба 2). Следует отметить, что эффект от обработки сохранялся практически на протяжении 1 ч. Так, по результатам механических испытаний (проба 7) после такой выдержки предел прочности несколько снизился, но при этом оставался на 13% выше по отношению к исходному состоянию (проба 1). Относительное удлинение изменилось незначительно и сохранило устойчиво повышенные значения – 7,5%, что на 30% выше по сравнению с исходным сплавом.

В табл. 3 представлены результаты металлографических исследований структуры сплава АК6М2. Видно, что непосредственно после обработки расплава магнитно-импульсными полями произошло наиболее ощутимое измельчение основных структурных составляющих: размер дендритов α -Al уменьшился на 23%, кристаллов Si_3 ,

– на 10%. При этом количество данных фаз увеличилось в 1,7 и 1,23 раза, соответственно. Последующие рафинирование и дегазация расплава несколько снизили эффект от МИО. Это, вероятно, связано с тем, что вместе с удалением нерастворимых неметаллических включений из расплава частично удаляются и унаследованные центры кристаллизации, что и вызывает укрупнение структурных составляющих в твердых сплавах. Повторная обработка магнитными полями снова оказывает модифицирующий эффект на структуру сплава АК6М2. Изображения микроструктур проб представлено на рис. 4.

Для исследования силового фактора МИО использовалось компьютерное моделирование. На данный момент единственным конечно-элементным комплексом позволяющим решать подобные сложные задачи является LS-DYNA. Это достигается за счет нового электромагнитного модуля, позволяющего моделировать подобные связанные процессы в комплексе, с учетом явлений электромагнетизма, тепла и механики [8].

При моделировании были рассмотрены опробованные на практике схемы МИО: радиальная и осевая. В качестве модели материала для описания расплава использовалась *MAT_NULL с уравнением состояния Ми-Грюнайзена (*EOS_GRUNEISEN). В качестве нагрузки ис-

Таблица 3. Влияние МИО на параметры микроструктуры сплава АК6М2

№ пробы	Параметры дендритов α -Al		Параметры Si_3	
	Средний размер, мкм	Количество, шт/мм ²	Средний размер, мкм	Количество, шт/мм ²
1	35	704	7,1	4880
2	27	1205	6,4	6000
3	31	960	6,9	6200
7	29	1041	6,7	6800

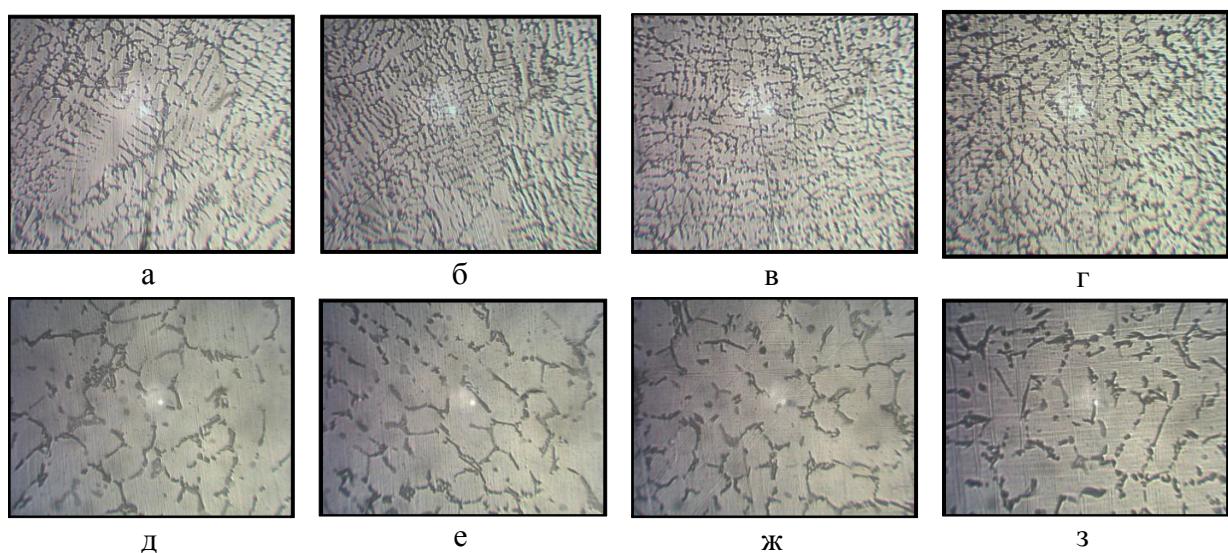


Рис. 4. Влияние МИО на микроструктуру сплава АК6М2

а-г – дендриты α -Al ($\times 100$); д-з – кристаллы Si_3 ($\times 500$);
а, д – проба 1; б, е – проба 2; в, ж – проба 3; г, з – проба 7 (табл. 5.2.1, 5.2.3)

пользуется токовая кривая, полученная экспериментальным путем с помощью пояса Роговского, которая назначена для определенных наборов сегментов индуктора. Таким образом при моделировании рассматривался только один импульс с разрядным током в индукторе, который соответствует значению энергии равному 1,5 кДж (рис. 5).

Одним из основных проявления магнитно-импульсного воздействия является давление импульсных магнитных полей на расплав (рис. 6, 7).

Видно, что при радиальном воздействии область наибольших концентраций давления находится в центральной зоне расплава, находящегося в тигле. При осевом воздействии давление распространяется от поверхности расплава, над которой расположен индуктор, в глубину тигля.

Наличие давлений вызывает ударную волну, которая способствует возникновению металлопотоков расплава. На рис. 8 и 9 показаны результаты моделирования по распространению ударных волн в расплаве при радиальном и осевом воздействиях. Видно, что при радиальном воздействии ударные волны распространяются от стенок тигля в центральные объемы расплава, где происходит их «схлопывание». После этого возникает, так называемая, отраженная ударная волна, распространяющаяся уже в обратном направлении: от центра к стенкам тигля.

О второй составляющей силового фактора МИО расплава можно судить по следующим результатам компьютерного моделирования, представленным на рис. 10. Здесь показана, в каче-

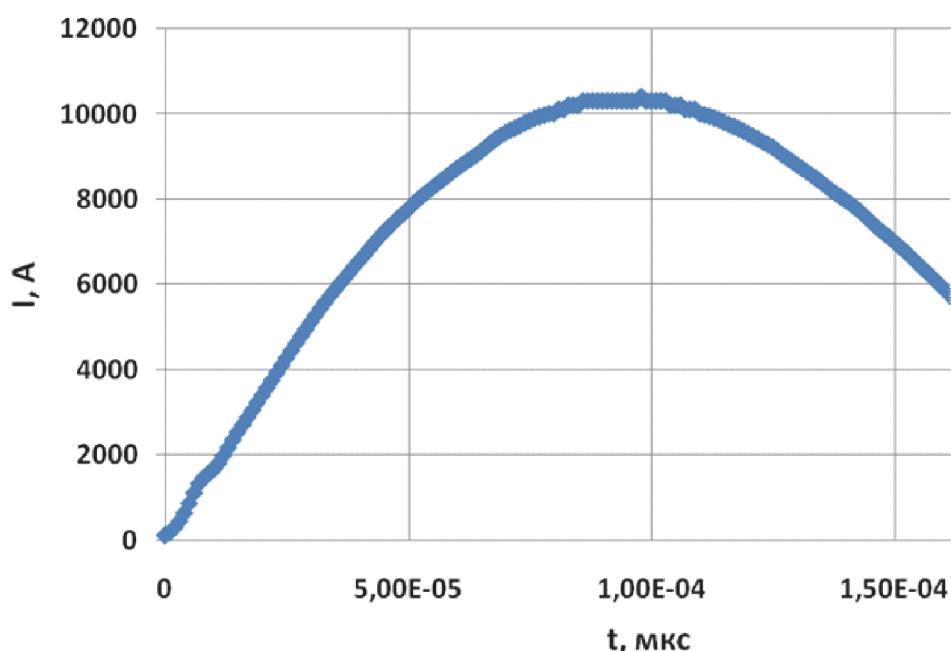


Рис. 5. Токовая кривая используемая при компьютерном моделировании

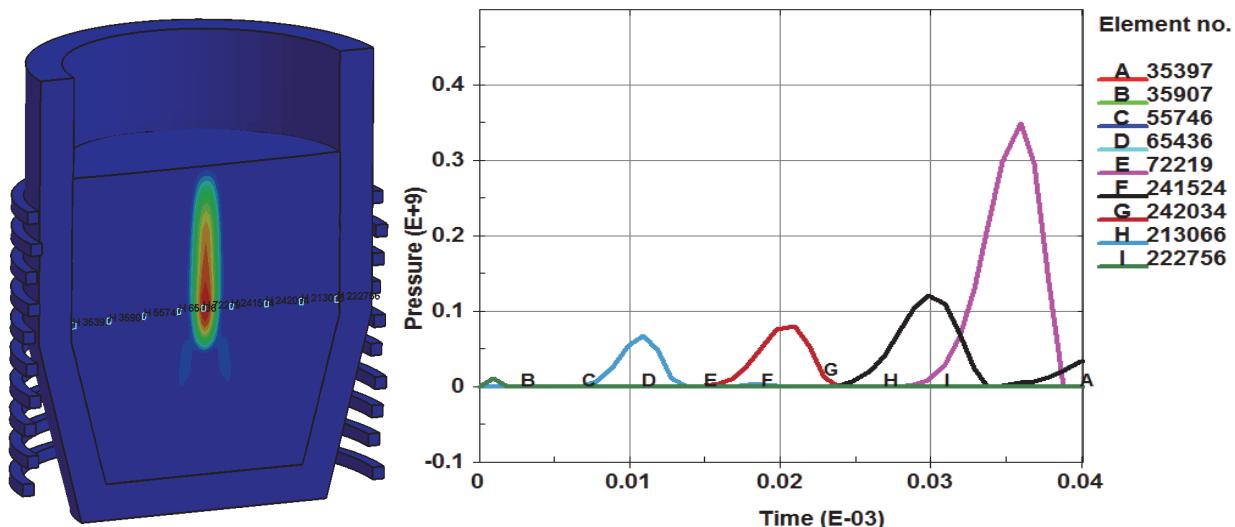


Рис. 6. Характер изменения давления ИМП от времени в характерных элементах по объему расплава при радиальной схеме воздействия

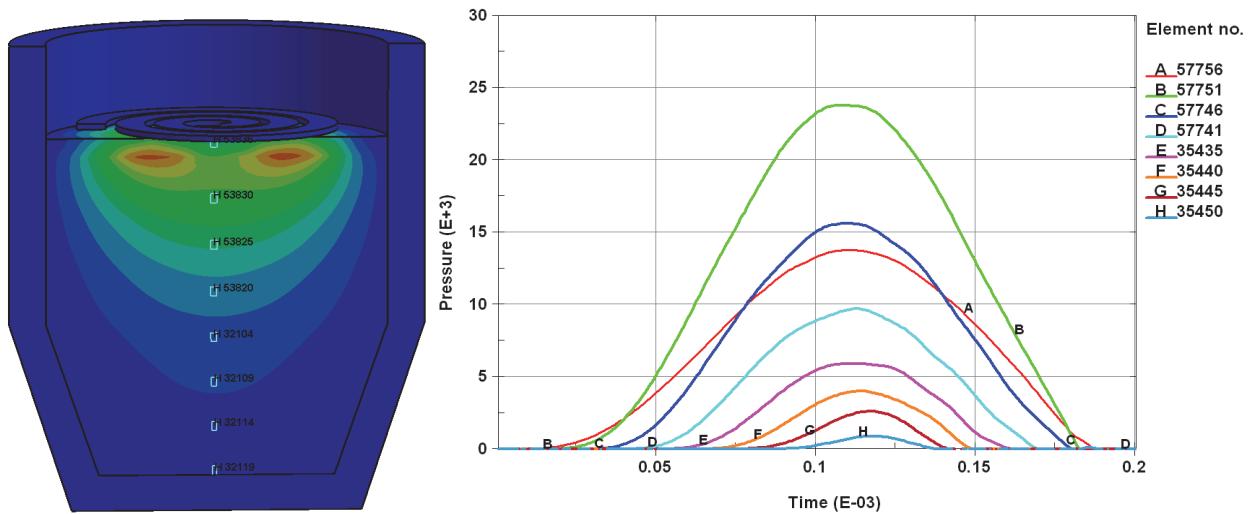


Рис. 7. Характер изменения давления ИМП от времени в характерных элементах по объему расплава при осевой схеме воздействия

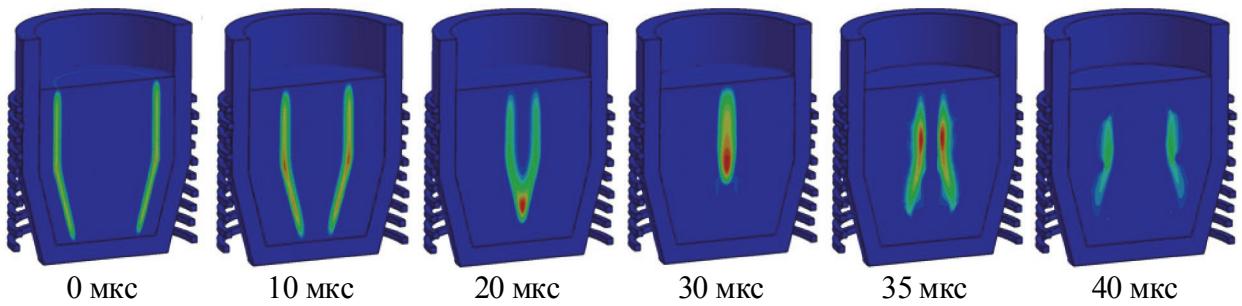


Рис. 8. Кинематика распространения ударной волны по объему расплава при радиальном воздействии

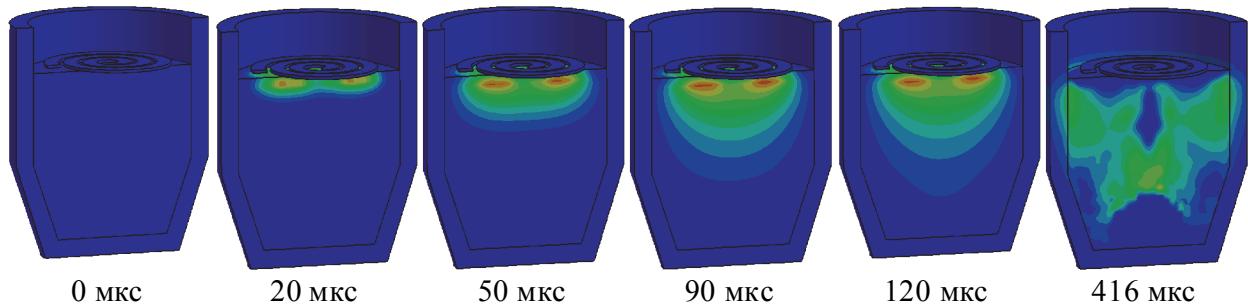


Рис. 9. Кинематика распространения ударной волны по объему расплава при осевом воздействии

стве примера, скорость перемещения расплава в векторной форме спустя 100 мкс после начала импульса разряда для осевой схемы воздействия импульсного магнитного поля.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования подтверждают наличие силового фактора МИО расплава и позволяют оценить его роль в механизме формирования структуры и механических свойств сплава после сопоставления с результатами экспериментальных исследований. А разработанный физический способ воздействия на расплав с помощью импульсного магнитного поля способствует повышению качества литого металла.

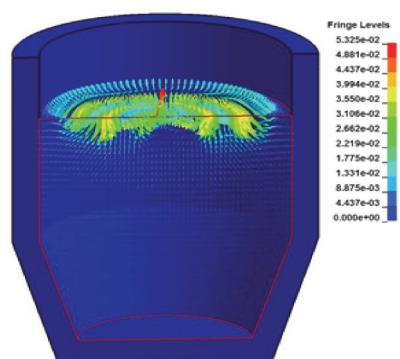


Рис. 10. Скорость перемещения расплава в векторной форме

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ри Э.Х., Ри Хосен, Дорофеев С.В., Якимов В.И. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразования и свойства литейных сплавов. Владивосток: Дальнаука. 2008. 177 с.
2. Грабовский В.М. Выбор технологии электрогидроимпульсной подготовки расплава к заливке // Металлургия машиностроения. 2009. №1. С. 29-34.
3. Влияние импульсного магнитного поля высокой напряженности на свойства жидкых алюминиевых сплавов // В.А. Глушенков, Ф.В. Гречников, В.И. Никитин, Д.Г. Черников, А.Ю. Иголкин, К.В. Никитин, А.А. Поздняков // Литейщик России. 2010. № 7. С. 34-39.
4. Конструкторские решения применения магнитно-импульсных технологий в литейном производстве / А.В. Мишуков, А.Н. Котов, Г.Г. Кривенко, А.А. Ефимов, В.А. Глушенков, Д.Г. Черников, С.А. Акишин // Литейщик России. 2011. № 7. С. 8-11.
5. О магнитно-импульсной обработке расплава силумина АК9Т / В.А. Глушенков, Ф.В. Гречников, А.Ю. Иголкин, В.И. Никитин, К.В. Никитин // Литейное производство. 2011. № 9. С. 8-11.
6. О воздействии импульсных магнитных полей на расплавы / В.А. Глушенков, Д.Г. Черников, В.И. Никитин, К.В. Никитин // Металлургия машиностроения. 2012. №4. С. 47-50.
7. Научно-исследовательская лаборатория “Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования” (НИЛ-41). URL: <http://www.nil41.ssau.ru> (дата обращения 07.07.2013).
8. Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulations / P. L'Eplattenier, G. Cook, C. Ascraft, M. Burger, J. Imbert and M. Worswick // Steel Research Int., vol 80, no. 5, 2009.

IMPROVEMENTS IN THE METHOD OF MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF ALUMINUM MELTS

© 2014 D.G. Chernikov¹, V.A. Glushchenkov¹, V.I. Nikitin², K.V. Nikitin²

¹Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)
²Samara State Technical University

This paper presents results of studies of the effect of parameters of pulse-magnetic processing of melts on the structure and mechanical properties of AK6M2, alloys, as well as the duration of the effects of this processing. Also two schemes of pulse-magnetic action on a melt - radial and axial are considered.

Keywords: Pulse-magnetic processing, Al-Si alloys, melt, technological schemes of action, microstructure, mechanical properties, quality.

Dmitry Chernikov, Candidate of Technics, Senior Research Fellow at the Laboratory of Advanced Technological Processes of Plastic Deformation, Assistant Lecturer at the Plastic Working of Metals Department. E-mail: 4ernikov82@mail.ru

Vladimir Glushchenkov, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Plastic Working of Metals Department, Scientific Adviser at the Laboratory of Advanced Technological Processes of Plastic Deformation. E-mail: imp@ssau.ru

Vladimir Nikitin, Doctor of Technics, Professor, Head at the Foundry and Enabling Technologies Department.

E-mail: tlp@samgtu.ru

Konstantin Nikitin, Doctor of Technics, Associate Professor, Chief Research Fellow at the Foundry and Enabling Technologies Department. E-mail: kvn-6411@mail.ru