

## ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМИ ПОЛЯМИ С ЦЕЛЬЮ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИЛУМИНОВ

© 2016 г. **К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин, В.А. Глушченков, Д.Г. Черников**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ)  
им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

*Статья поступила в редакцию 04.12.14 г., подписана в печать 23.12.14 г.*

Выполнено компьютерное моделирование основных силовых факторов при обработке алюминиевых расплавов импульсными магнитными полями по радиальной и осевой схемам воздействия. Установлено, что при радиальной схеме ударная волна, возникающая в расплаве после единичного импульса, прорабатывает весь его объем в течение 40 мкс, а по осевой — в течение 416 мкс. Экспериментальные исследования на промышленных силуминах АК6М2 и АК10М2Н подтвердили наличие устойчивого модифицирующего эффекта при магнитно-импульсной обработке (МИО): уменьшаются размеры дендритов  $\alpha$ -Al и кристаллов эвтектического кремния, повышаются плотность и электропроводность, а также прочность и пластичность сплавов в литом состоянии. На основании экспериментальных исследований сделан вывод о наибольшей технологичности МИО при осевой схеме воздействия.

**Ключевые слова:** физические способы обработки расплавов, импульсные магнитные поля, алюминиевые расплавы, магнитно-импульсная обработка, силумины, компьютерное моделирование, ударная волна, модифицирование, микроструктура, физико-механические свойства сплавов.

**Никитин К.В.** — докт. техн. наук, доцент, гл. науч. сотрудник кафедры литейных и высокоэффективных технологий СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). E-mail: kvn-6411@mail.ru.

**Никитин В.И.** — докт. техн. наук, проф., заведующий той же кафедрой. E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Тимошкин И.Ю.** — канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: ivan-mns@mail.ru.

**Глушченков В.А.** — канд. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением (ОМД), науч. руководитель лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования» (НИЛ-41) СГАУ (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34). Тел./факс: (846) 335-18-45. E-mail: imp@ssau.ru.

**Черников Д.Г.** — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НИЛ-41, ассистент кафедры ОМД СГАУ. Тел.: (846) 334-09-04. E-mail: omd@ssau.ru.

**Для цитирования:** Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю., Глушченков В.А., Черников Д.Г. Обработка расплавов магнитно-импульсными полями с целью управления структурой и свойствами промышленных силуминов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 2. С. 34–42. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-34-42.

*Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G.*

### **Treatment of melts by pulsed magnetic fields to control the structure and properties of industrial silumins**

Computer modeling was used to simulate main force factors of aluminum melt processing by pulsed magnetic fields both in the radial and axial impact pattern. It was found that a shock wave arising after a single pulse propagates throughout the melt volume within 40  $\mu$ s in the radial impact pattern, and within 416  $\mu$ s in the axial pattern. Experimental studies of Al–Si–Cu and Al–Si–Cu–Ni industrial silumins confirmed a sustainable modifying effect resulting from the magnetic-pulse treatment (MPT):  $\alpha$ -Al dendrites and eutectic silicon crystals are reduced in size, while density and electrical conductivity of as-cast alloys increase along with their mechanical properties and ductility. Based on the experimental studies it was concluded that the best MPT performance is obtained with the axial impact pattern.

**Keywords:** physical methods of alloy processing, pulsed magnetic fields, aluminum-based melts, magnetic pulse treatment, silumins, computer modeling, shock wave, modification, microstructure, physical and mechanical properties of alloys.

**Nikitin K.V.** — Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof., Chief Researcher at the Department of foundry and high-efficiency technologies, Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244). E-mail: kvn-6411@mail.ru.

**Nikitin V.I.** — Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the same Department, SSTU. E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Timoshkin I.Yu.** — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the same Department, SSTU. Email: ivan-mns@mail.ru.

**Glushchenkov V.A.** — Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of metal forming, scientific, Director of the laboratory «Advanced technological processes of plastic deformation» (SRL-41) of Samara State Aerospace University (SSAU) (443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34). E-mail: imp@ssau.ru.

**Chernikov D.G.** — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of SRL-41, Assistant of the Department of metal forming of SSAU. E-mail: omd@ssau.ru.

**Citation:** Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G. Obrabotka rasplavov magnitno-impul'snymi polyami s tsel'yu upravleniya strukturoi i svoystvami promyshlennykh siluminov. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 2. P. 34–42. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-34-42.

## Введение

В настоящее время накоплен большой арсенал различных способов воздействия на твердые, жидкие и кристаллизующиеся сплавы с целью управления их структурой и свойствами в системе твердое—жидкое—твердое. Согласно классификации специальных способов обработки шихтовых металлов большинство воздействий на расплавы можно отнести к физическим методам [1], и основное их назначение — получение литой модифицированной структуры с целью обеспечения высоких физико-механических свойств литых изделий.

Среди основных требований, предъявляемых к физическим способам обработки расплавов, можно выделить следующие: неизменность химического состава рабочего сплава, живучесть модифицирующего эффекта в процессе литья, отсутствие вредных выбросов в атмосферу литейного цеха. Наибольшее распространение эти методы получили при подготовке к литью расплавов на основе алюминия [2—12].

Перспективным физическим способом является обработка расплавов на основе алюминия импульсными магнитными полями — магнитно-импульсная обработка (МИО) [13, 14].

Цель настоящей работы состояла в исследовании МИО на структуру и свойства силуминов автомобильного назначения.

## Материалы и методика экспериментов

Эксперименты по влиянию магнитно-импульсной обработки на структуру и свойства сплавов АК6М2 (ГОСТ 1583-93) и АК10М2Н (ГОСТ 30620-98) выполняли в ЦЛТ СамГТУ на опытной магнитно-импульсной установке МИУ-5, разработанной и изготовленной специалистами НИЛ-41 СГАУ. В качестве шихтовых материалов использовали чушковые сплавы (стандартные чушки массой 17—20 кг). Рабочие сплавы готовили в печи сопротивления с графитовым тиглем емкостью 10 кг по алюминию. Чушки разрезали на мерные части и загружали в разогретый до 600 °С тигель печи. После расплавления шихты расплавы перегревали до 750±10 °С, 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.

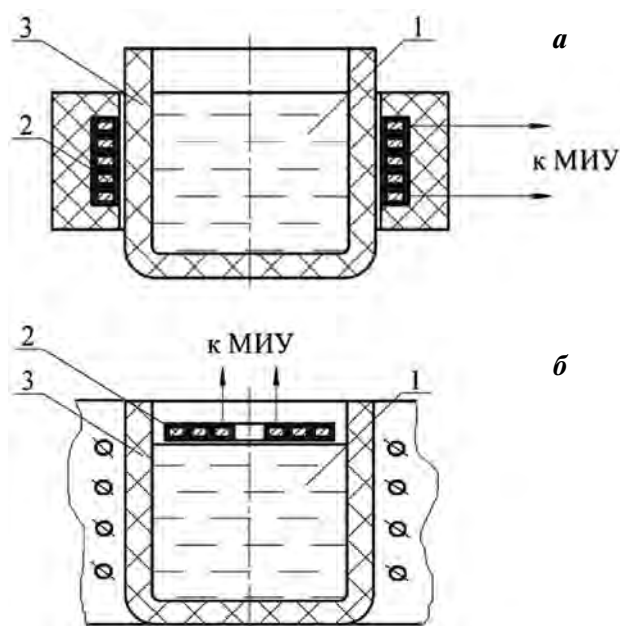


Рис. 1. Радиальная (а) и осевая (б) схемы магнитно-импульсной обработки расплавов  
1 — расплав; 2 — индуктор; 3 — тигель

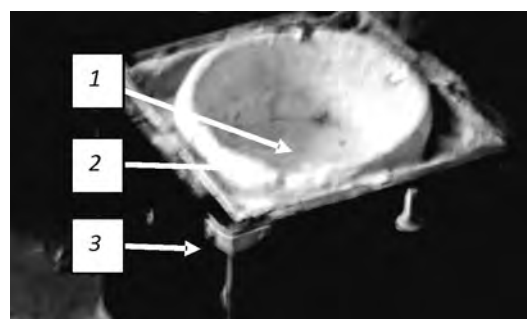
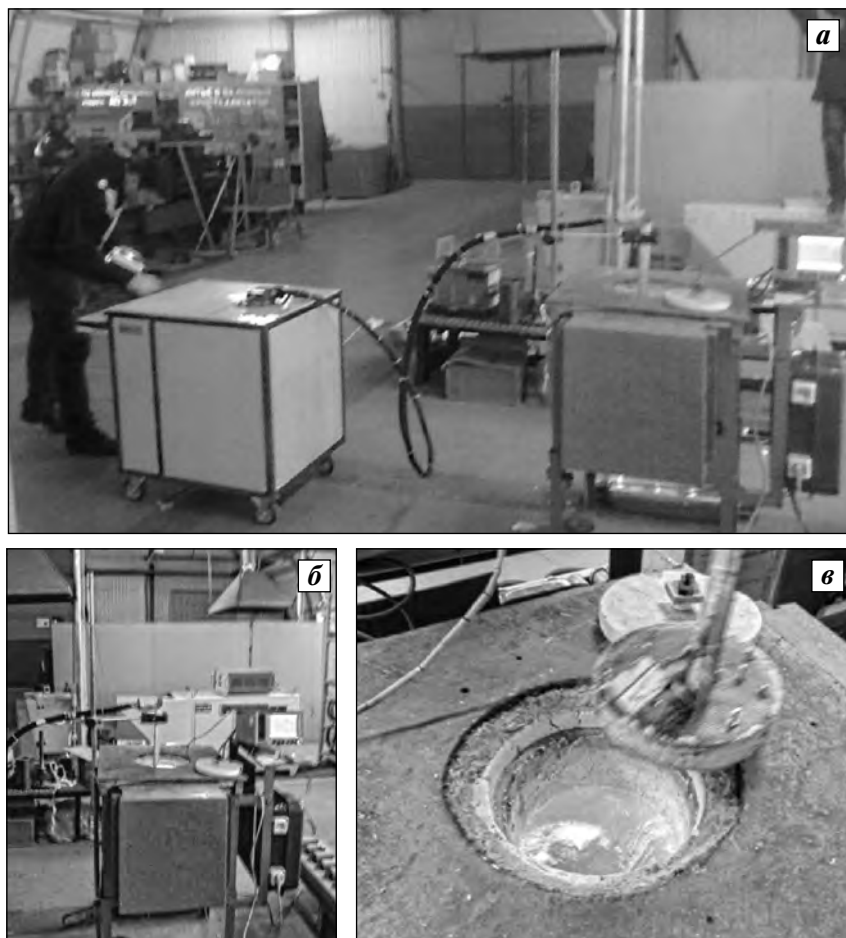


Рис. 2. Устройство для МИО расплава по радиальной схеме  
1 — расплав; 2 — тигель; 3 — тепловая камера

Расплавы подвергали МИО по двум схемам воздействия импульсными магнитными полями — радиальной и осевой (рис. 1).

При обработке по радиальной схеме расплавы из печи переливали в специальную тепловую камеру с индуктором, внутри витков которого располагался графитовый тигель (рис. 2). Расплавы предварительно нагревали до температуры 790±10 °С для компенсации теплотерь при их переливе. Далее перелитую порцию расплава подвергали МИО. Осевую схему воздействия реализовали непосредственно в тигле плавильной печи (рис. 3).

В обоих случаях варьировали энергией разряда ( $W = 1\div 1,5$  кДж) и количеством импульсов ( $n = 5\div 10$  шт.).



**Рис. 3.** Обработка расплава магнитно-импульсными полями в тигле плавильной печи сопротивления по осевой схеме воздействия  
**а** — общий вид установки; **б** — индуктор во время обработки; **в** — индуктор и зеркало расплава после обработки

Механические свойства определяли на отдельно залитых в кокиль образцах в литом состоянии. Металлографический анализ выполняли с помощью программно-аппаратного комплекса «SIAMS-700». Плотность оценивали методом гидростатического взвешивания, электропроводность — с помощью вихретокового структуроскопа ВС-30Н.

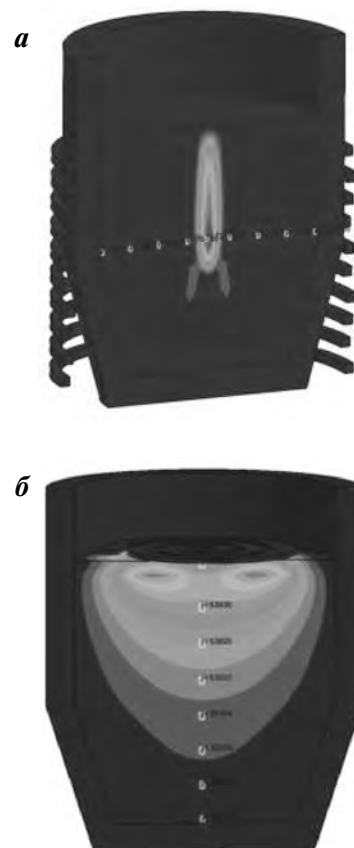
### Компьютерное моделирование МИО при различных схемах воздействия

Компьютерное моделирование осуществляли с целью определения влияния силового фактора МИО на состояние расплавов. На данный момент единственным конечно-элементным комплексом, способным решать такие сложные задачи, является LS-DYNA. Это достигается за счет нового электромагнитного модуля, позволяющего моделировать подобные связанные процессы в ком-

плексе с учетом явлений электромагнетизма, тепла и механики [15]. С целью сокращения времени модельного эксперимента рассматривался только 1 импульс с разрядным током в индукторе, который соответствует энергии  $W = 1,5$  кДж.

Характер распределения давления импульсных магнитных полей в расплаве при разных схемах МИО представлен на рис. 4. Видно, что при радиальном воздействии область наибольших концентраций давления находится в центральной зоне расплава, находящегося в тигле, а при осевом — давление распространяется от поверхности расплава, над которой расположен индуктор, в глубину тигля. Наличие давлений вызывает ударную волну, которая способствует возникновению metalloпотоков расплава.

Особенности различных схем МИО определяют различия и в распространении ударных волн в объеме расплава (рис. 5).



**Рис. 4.** Зависимость изменения давления магнитно-импульсных полей от времени в характерных элементах по объему расплава при радиальной (**а**) и осевой (**б**) схемах воздействия

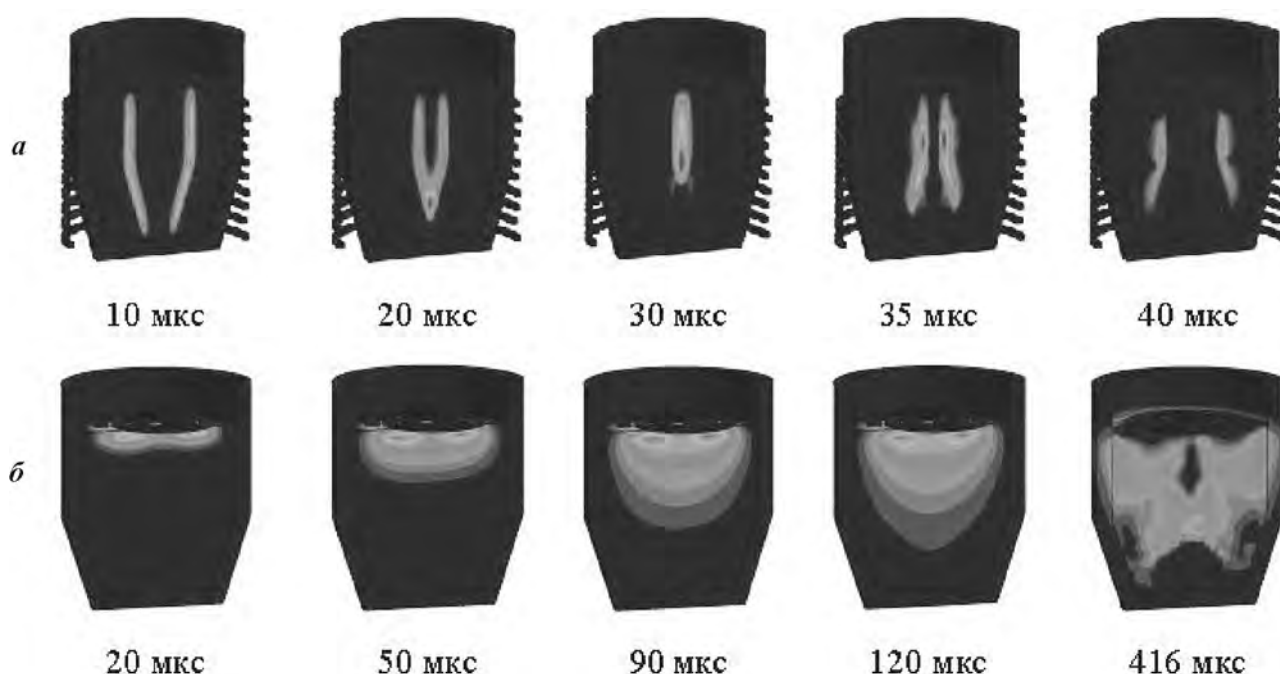


Рис. 5. Кинематика распространения ударной волны по объему расплава для радиальной (а) и осевой (б) схем воздействия импульсными магнитными полями

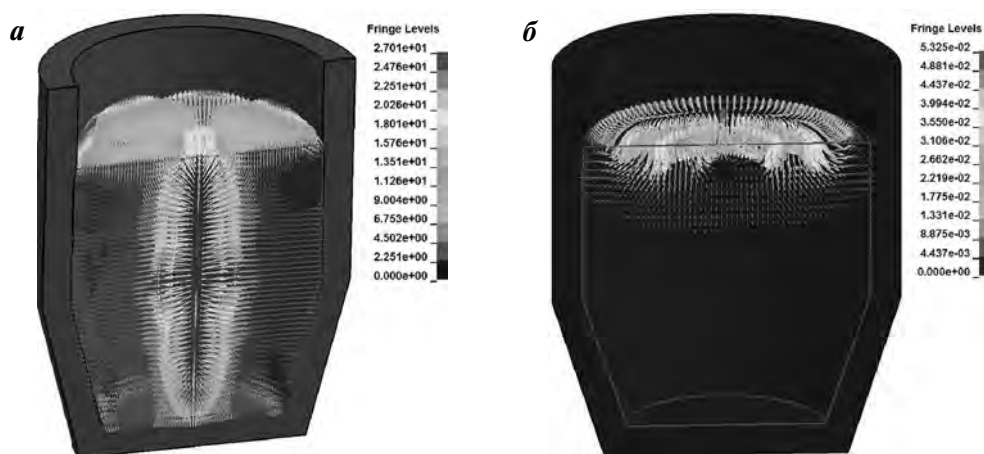


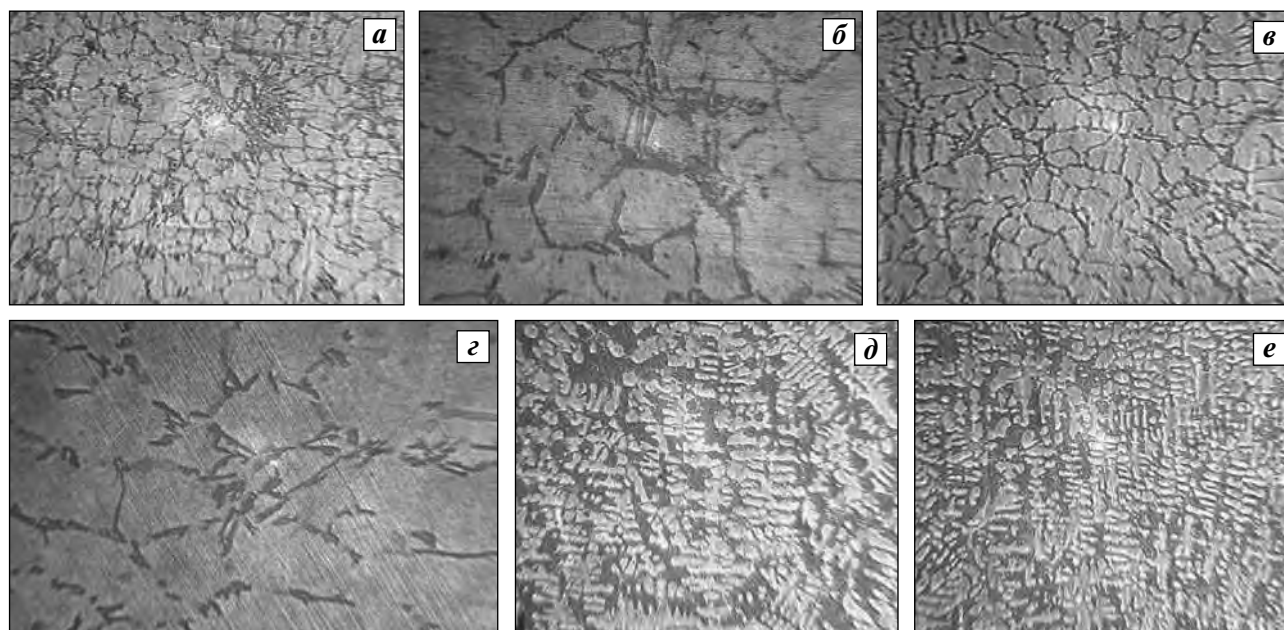
Рис. 6. Влияние радиальной (а) и осевой (б) схем воздействия импульсными магнитными полями на скорость движения расплава в тигле  
Результаты моделирования представлены в векторном виде через 100 мкс после импульса

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. Обработка всего объема расплава за счет прямой и отраженной волн происходит за очень короткое время — 40 мкс.

При осевой схеме МИО распространение волны по всему объему расплава протекает за более

длительный промежуток времени (416 мкс) по сравнению с предыдущим случаем. При этом отраженная волна формируется от всех образующих внутренней поверхности тигля.

На рис. 6 приведены результаты моделирования скоростей движения расплава в векторном виде через 100 мкс после импульса в зависимости от схемы воздействия. Видно, что при радиальной схеме наибольшие скорости движения расплава приходятся на центральные объемы, что согласуется с результатами моделирования дав-



**Рис. 7.** Влияние МИО ( $W = 2$  кДж,  $n = 5$ ) при радиальном воздействии на структуру сплавов АК6М2 (а–г) и АК10М2Н (д, е)

а, б, д – исходные образцы; в, г, е – после МИО  
а, в, д, е – увеличение  $100\times$ ; б, г –  $500\times$

лений и кинематики распространения ударной волны, а при осевой — в верхних объемах расплава, располагающихся непосредственно под индуктором.

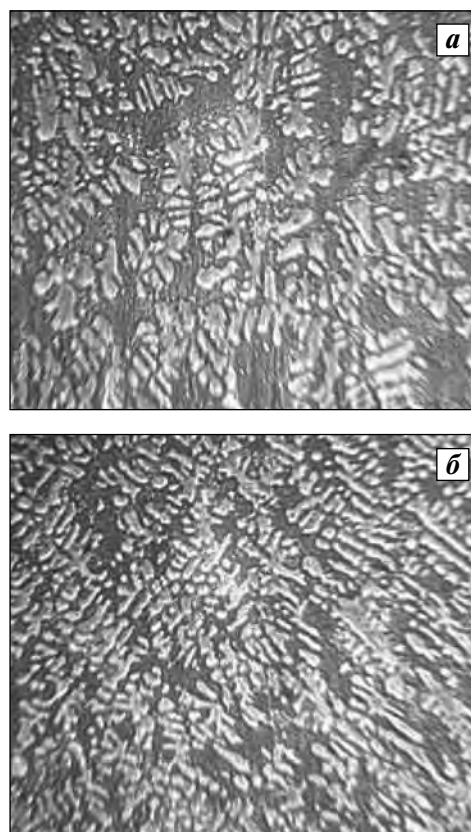
Таким образом, результаты компьютерного моделирования подтверждают наличие силового фактора при МИО расплавов и позволяют оценить их роль в механизме формирования структуры и свойств сплавов при данном виде физического воздействия.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

### Обработка по радиальной схеме воздействия

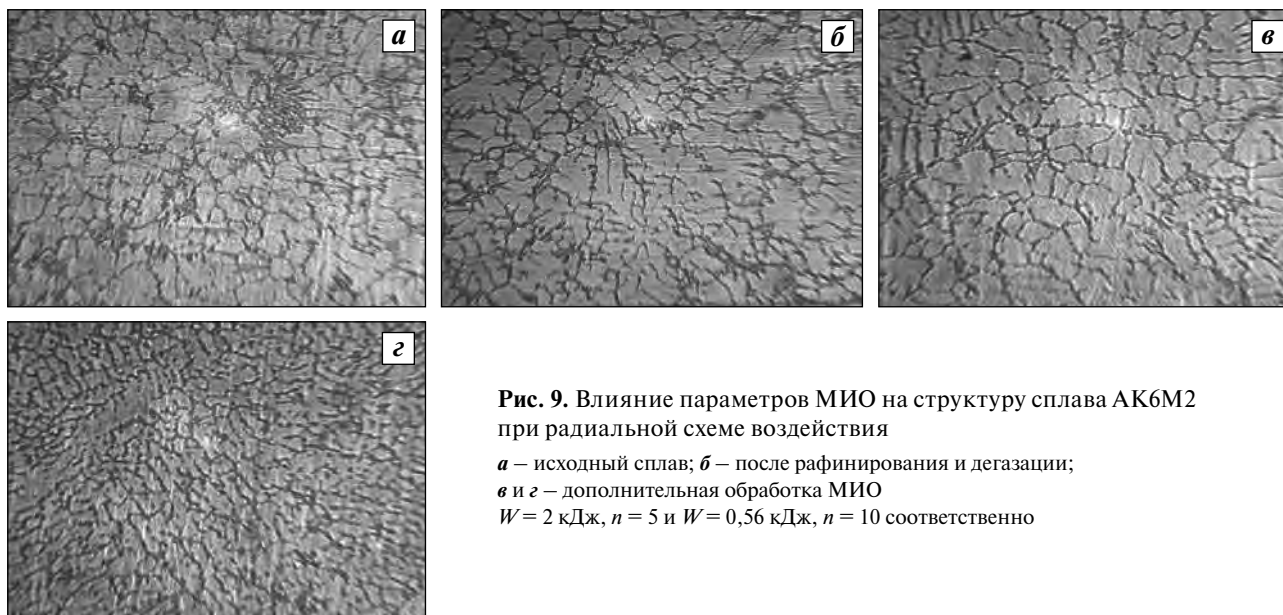
На рис. 7 показано влияние МИО на микроструктуру образцов сплавов АК6М2 и АК10М2Н. Из его данных видно, что при энергии разряда  $W = 2$  кДж и количестве импульсов  $n = 5$  воздействие магнитными полями наиболее ощутимо сказалось на структуре сплава АК6М2: измельчились дендриты  $\alpha$ -Al, а эвтектический кремний и вторичные интерметаллидные фазы приобрели более компактную морфологию. В микроструктуре сплава АК10М2Н после МИО отмечено изменение морфологии дендритов  $\alpha$ -Al на более компактную глобулярную.

На рис. 8 показано влияние МИО на структуру сплава АК10М2Н, предварительно обработанного



**Рис. 8.** Влияние МИО на структуру сплава АК10М2Н после рафинирующе-дегазирующей обработки

а – исходный сплав, б – после МИО  
 $W = 2$  кДж,  $n = 5$ , увеличение –  $100\times$



**Рис. 9.** Влияние параметров МИО на структуру сплава АК6М2 при радиальной схеме воздействия

*a* – исходный сплав; *б* – после рафинирования и дегазации;  
*в* и *г* – дополнительная обработка МИО  
 $W = 2$  кДж,  $n = 5$  и  $W = 0,56$  кДж,  $n = 10$  соответственно

флюсом ФНК-А и препаратом «Дегазер». Видно, что после рафинирования и дегазации эффект измельчения МИО на структуру АК10М2Н проявляется сильнее: уменьшаются размеры, разветвленность и неоднородность распределения дендритов  $\alpha$ -Al.

Далее был проведен эксперимент по влиянию основных параметров МИО (энергии разряда и количества импульсов) на структуру сплава АК6М2 (рис. 9), который показал, что обработка рафинированного и дегазированного расплава по режиму  $W = 0,56$  кДж,  $n = 10$  способствует большему измельчению дендритов алюминия по сравнению с режимом  $W = 2$  кДж,  $n = 5$  (см. рис. 9, *г* и *в*).

Предварительные эксперименты по отработке методики магнитно-импульсной обработки расплавов АК6М2 и АК10М2Н в радиальной схеме исполнения выявили модифицирующее влияние данного вида физического воздействия на основные фазы сплавов. Однако технический анализ данной схемы применительно для технологий большинства промышленных предприятий выявил ее существенные недостатки:

- необходимость на участке обработки расплавов специальной тепловой камеры, оснащенной индуктором;
- транспортировка обработанного расплава и его перелив в раздаточную печь.

Данные факторы, во-первых, будут способствовать усложнению действующих на предприятиях технологий, а во-вторых, обуславливать снижение эффективности МИО.

В связи с этим наиболее оптимальным вариантом с технической и технологической точек зрения представляется магнитно-импульсная обработка расплавов в раздаточной емкости непосредственно на участке литья.

### Обработка по осевой схеме воздействия

Эксперименты проводили на сплаве АК6М2. Расплав при  $t = 750 \pm 10$  °С обрабатывали импульсами в количестве 10 шт. при энергии разряда 1,5 кДж. Далее при этой же температуре дегазировали препаратом «Дегазер» и рафинировали порошкообразным флюсом ФНК-А. Порядок отбора проб на механические испытания, плотность и металлографическое исследование представлен в табл. 1.

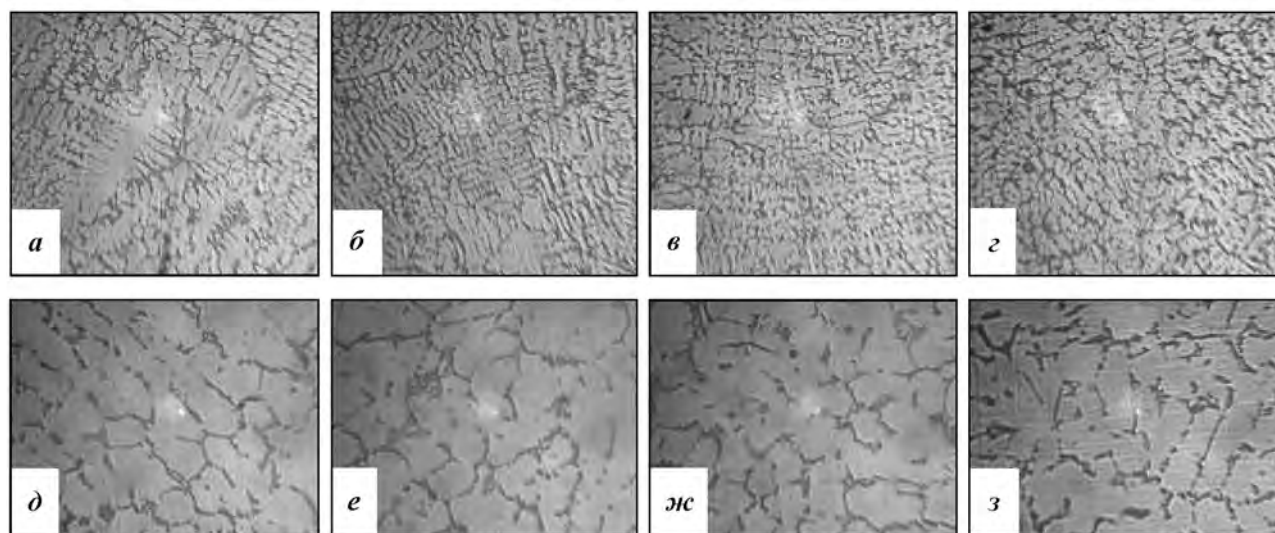
Влияние МИО на физико-механические свойства сплава АК6М2 в литом состоянии иллюстрирует табл. 2. Из ее данных видно, что после обработки расплава импульсными магнитными полями по осевой схеме воздействия ( $W = 1,5$  кДж,  $n = 10$ ) плотность ( $\rho$ ) и электропроводность ( $\gamma$ ) сплава незначительно увеличиваются: с 2,708 до 2,715 г/см<sup>3</sup> и с 17,4 до 17,8 МСм/м соответственно (пробы 1 и 2). Повышение электропроводности сплава свидетельствует об измельчении его основных структурных составляющих. После рафинирования, дегазации и повторного воздействия МИО данные физические свойства стабилизируются, но практически не меняются.

Наиболее существенные изменения отмечены в значениях механических свойств. Так, непосред-

Таблица 1

**Порядок отбора проб при обработке расплава АК6М2 по осевой схеме воздействия**

№ пробы*	Операция
1	Перегрев расплава до 750+100 °С, съем шлака, перемешивание
2	МИО расплава, выдержка после обработки 2 мин
3	Обработка расплава флюсом ФНК-А и препаратом «Дегазер», выдержка после обработки 15 мин
4	Повторная обработка МИО расплава, выдержка после обработки 60 мин
* Заливка отдельно отлитых в кокиль образцов для механических испытаний.	

**Рис. 10.** Влияние МИО на микроструктуру сплава АК6М2

а, д – проба 1; б, е – 2; в, ж – 3; з, з – 4

а–г – дендриты α-Al (×100); д–з – кристаллы Si<sub>эвт</sub> (×500)

ственно после МИО предел прочности ( $\sigma_B$ ) и относительное удлинение ( $\delta$ ) увеличились на 26 % (проба 2). Последующие рафинирование и дегазация (проба 3) способствовали незначительному росту  $\sigma_B$  и  $\delta$  сплава по сравнению с расплавом (проба 2), обработанным только импульсными магнитными полями. Следует отметить, что эффект от обработки сохранялся практически на протяжении 1 ч. Так, по результатам механических испытаний (проба 4) 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 повышенное значение 7,5 %, что на 30 % больше, чем у исходного сплава.

В табл. 3 представлены результаты металлографических исследований структуры сплава АК6М2. Видно, что непосредственно после магнитно-импульсной обработки расплава (проба 2) произошло наиболее ощутимое измельчение ос-

Таблица 2

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

№ пробы	Физические свойства		Механические свойства	
	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\gamma$ , МСм/м	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
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	2,716	17,6	212,0	7,5

новных структурных составляющих: размер дендритов α-Al уменьшился на 23 %, а кристаллов Si<sub>эвт</sub> — 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 (проба 3). Это, вероятно, связано с тем, что вместе с удалением нерастворимых неметаллических включений из рас-



Таблица 3  
Влияние МИО на параметры микроструктуры сплава АК6М2

№ пробы	Параметры дендритов $\alpha$ -Al		Параметры Si <sub>эвт</sub>	
	Средний размер, мкм	Количество, шт./мм <sup>2</sup>	Средний размер, мкм	Количество, шт./мм <sup>2</sup>
1	35	704	7,1	4880
2	27	1205	6,4	6000
3	31	960	6,9	6200
4	29	1041	6,7	6800

сплава 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 (проба 4).

Изображения микроструктур образцов сплава, на которых выполнялся металлографический анализ, представлены на рис. 10.

Таким образом, проведенные исследования показали, что осевая схема воздействия на расплав импульсными магнитными полями так же, как и радиальная, оказывает устойчивое модифицирующее воздействие на основные фазовые составляющие сплава. Уменьшение размеров фаз способствует росту предела прочности и относительного удлинения сплава в литом состоянии. Применение МИО и рафинирующе-дегазирующей обработки обеспечивает дополнительное увеличение механических свойств. Однако анализ микроструктуры сплава АК6М2 показал, что магнитно-импульсную обработку целесообразно производить после очистки расплава от неметаллических и газовых включений.

## Заключение

Выполненное компьютерное моделирование по распространению ударных волн в расплаве при МИО позволило выявить основные различия при обработке по радиальной и осевой схемам воздействия. Установлено, что в первом случае ударная волна после единичного импульса проходит через весь объем расплава за 40 мкс, а во втором — в течение 416 мкс. Однако для промышленных условий данные временные различия являются несущественными.

На основе моделирования впервые установлены основные силовые факторы, обеспечивающие изменения в строении обрабатываемого расплава:

наличие ударных волн и интенсивные металлопоток, обуславливающие перемешивание всего объема расплава, находящегося в тигле.

Экспериментальные исследования убедительно доказали наличие модифицирующего эффекта при магнитно-импульсной обработке при радиальной и осевой схемам воздействия: измельчаются основные структурные составляющие силуминов, улучшаются физико-механические свойства сплавов. Однако с точки зрения технологичности наибольшими преимуществами характеризуется осевая схема воздействия, при которой не требуется дополнительное оборудование в виде тепловой камеры, отпадает необходимость в переливках обработанного расплава, обеспечивается возможность обработки непосредственно в тиглях раздаточных печей на участках литья.

*Работа выполнена в рамках тематического плана СамГТУ по заданию Минобрнауки РФ по теме «Исследование закономерностей и разработка технологий синтеза наноструктурированных алюминиевых сплавов для обеспечения повышенных эксплуатационных свойств литых изделий» (договор 507/14).*

## Литература

1. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах. М.: Машиностроение-1, 2005.
2. Деев В.Б., Селянин И.Ф., Нохрина О.И., Горюшкин В.Ф., Цецорина С.А. Модифицирующая обработка сплавов магнитным полем // Литейщик России. 2008. No. 3. С. 23—25.
3. Эскин Г.И. Влияние кавитационной обработки расплава на структуру и свойства литых и деформированных легких сплавов // Вестник РАЕН. 2010. No. 3. С. 82—89.
4. Зарембо В.И. Фоновое резонансно-акустическое управление гетерофазными процессами // Теоретические основы химической технологии. 2006. Т. 49. No. 5. С. 520—532.
5. Ри Э.Х., Хосен Ри, Дорофеев С.В. и др. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы



- кристаллизации, структурообразования и свойства литейных сплавов. Владивосток: Дальнаука, 2008.
6. Никитин К.В., Паркин А.А., Жаткин С.С., Мулинделев Д.А. Влияние структуры лигатур AlSi30 и AlNi30, полученных с применением комбинированной обработки, на свойства сплава АК10М2Н // Литейщик России. 2012. No. 9. С. 14—16.
  7. Волков Г.В. Влияние электрогидроимпульсной обработки на структурообразование сплавов и технологичность последующих операций // Литейное пр-во. 2012. No. 9. С. 16—17.
  8. Piątkowski J. The effect of Al—17wt.%Si alloy melt overheating on solidification process and microstructure evolution // Solid State Phenomena. 2011. Vol. 176. P. 29—34.
  9. Shittu M.D., Ibitoye S.A., Olowale J.O., Popoola A.P.I. Superheat influence on mechanical properties of cast hypoeutectic aluminium-silicon alloy // Inter. J. Cast Metals Research. 2012. Vol. 25. No. 3. P. 170—175.
  10. Piątkowski J., Gajdzik B., Matuła T. Crystallization and structure of cast A390.0 alloy with melt overheating temperature // Metalurgija. 2012. Vol. 51. No. 3. P. 321—324.
  11. Calvo-Dahlborg M., Popel P.S., Kramer M.J., Besser M., Morris J.R., Dahlborg U. Superheat-dependent microstructure of molten Al—Si alloys of different compositions studied by small angle neutron scattering // J. Alloys and Compounds. 2013. Vol. 550. P. 9—22.
  12. Barekar N.S., Babu N.H., Fan Z., Dhindaw B.K. Effect of intensive shearing on morphology of primary silicon and properties of hypereutectic Al—Si alloy // Mater. Sci. Technol. 2010. Vol. 26. No. 8. P. 975—980.
  13. Черников Д.Г., Глуценков В.А., Гречников Ф.В., Иголкин А.Ю., Никитин В.И., Никитин К.В. О магнитно-импульсной обработке расплава силумина АК9Т // Литейное пр-во. 2011. No. 9. С. 8—11.
  14. Глуценков В.А., Черников Д.Г., Никитин В.И., Никитин К.В. О воздействии импульсных магнитных полей на расплавы // Металлургия машиностроения. 2012. No. 4. С. 47—50.
  15. L'Eplattenier P., Cook G., Ascraft C., Burger M., Imbert J., Worwick M. Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulations // Steel Research Int. 2009. Vol. 80. No. 5. P. 38—56.
  4. Zarembo V.I. Fonovoe rezonansno-akusticheskoe upravlenie geterofaznimi processami [Background resonance-acoustic control of heterophase processes]. Teoreticheskie osnovi himicheskoi tekhnologii. 2006. Vol. 49. No. 5. P. 520—532.
  5. Ri E.H., Ri Hosen, Dorofeev S.V., Yakimiv V.I. Vliyanie oblycheniya zgidkoi fazi nanosekondnymi elektromagnitnymi impul'sami na ee strienie, processi kristallizacii, strykturoobrazovanie i svoystva liteinih splavov [Effect of irradiation of the liquid phase by nanosecond electromagnetic pulses on its structure, crystallization, structure and properties of casting alloys]. Vladivostok: Dal'nayka, 2008.
  6. Nikitin K.V., Parkin A.A., Zatkin S.S., Mulindeev D.A. Vliyanie stryktury ligatyr AlSi30 i AlNi30, polyshennix s primeneniem kombinirovannoi obrabotki, na svoystva splava AK10M2H [The effect of the structure of ligatures AlSi30 and AlNi30 obtained using the combined treatment on the properties of the alloy AK10M2H]. Liteishik Rossii. 2012. No. 9. P. 14—16.
  7. Volkov G.V. Vliyanie elektrogidroiimpul'snoyi obrabotki na strykturoobrazovanie splavov i tehnologishnost posledyushih operacii [The influence of hydro-processing on structure of alloys and manufacturability subsequent operations]. Liteinoe proizvodstvo. 2012. No. 9. P. 16—17.
  8. Piątkowski J. The effect of Al—17wt.%Si alloy melt overheating on solidification process and microstructure evolution. Solid State Phenomena. 2011. Vol. 176. P. 29—34.
  9. Shittu M.D., Ibitoye S.A., Olowale J.O., Popoola A.P.I. Superheat influence on mechanical properties of cast hypoeutectic aluminium-silicon alloy. Inter. J. Cast Metals Research. 2012. Vol. 25. No. 3. P. 170—175.
  10. Piątkowski J., Gajdzik B., Matuła T. Crystallization and structure of cast A390.0 alloy with melt overheating temperature. Metalurgija. 2012. Vol. 51. No. 3. P. 321—324.
  11. Calvo-Dahlborg M., Popel P.S., Kramer M.J., Besser M., Morris J.R., Dahlborg U. Superheat-dependent microstructure of molten Al—Si alloys of different compositions studied by small angle neutron scattering. J. Alloys and Compounds. 2013. Vol. 550. P. 9—22.
  12. Barekar N.S., Babu N.H., Fan Z., Dhindaw B.K. Effect of intensive shearing on morphology of primary silicon and properties of hypereutectic Al—Si alloy. Mater. Sci. Technol. 2010. Vol. 26. No. 8. P. 975—980.
  13. Chernikov D.G., Glysenkov V.A., Grechnikov F.V., Igolkin A.Yu., Nikitin V.I., Nikitin K.V. O magnitno-impul'snoi obrabotke raspava silymina AK9T [Of magnetic-pulse processing of molten silumin]. Liteinoe proizvodstvo. 2011. No. 9. P. 8—11.
  14. Glysenkov V.A., Chernikov D.G., Nikitin V.I., Nikitin K.V. O vozdiistvii impul'snih magnitnih polei na raspavi [About the effects of pulsed magnetic fields on the melt. Metallurgiya mashinostroeniya. 2012. No. 4. P. 47—50.
  15. L'Eplattenier P., Cook G., Ascraft C., Burger M., Imbert J., Worwick M. Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulations. Steel Research Int. 2009. Vol. 80. No. 5. P. 38—56.

## References

1. Nikitin V.I., Nikitin K.V. Nasledstvennost' v litih splavah [Heredity in cast alloys]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005.
2. Deev V.B., Sel'yanin I.F., Nohrina O.I., Goryushkin V.F., Cecorina S.A. Modifitsiryushaya obrabotka splavov magnitnim polem [Modifying treatment of alloys by magnetic field]. Liteishik Rossii. 2008. No. 3. P. 23—25.
3. Eskin G.I. Vliyanie kavitacionnoi obrabotki raspava na stryktury i svoystva litih b deformirovannih l'ogkih splavov [The influence of cavitation treatment of the melt on the structure and properties of cast and deformed light alloys]. Vestnik RAEN. 2010. No. 3. P. 82—89.