

УДК 669-404:621.785:537.531

**А. В. Синчук, В. Н. Цуркин, А. В. Иванов, А. С. Рубан**

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **СИЛОВОЕ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ТВЕРДОЖИДКИЙ АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ А357**

*Обоснован и экспериментально опробован метод магнитоимпульсной обработки твердожидкого алюминиевого сплава А357 в форме с помощью плоского индуктора. Установлено, что степень уплотнения и измельчения дендритной структуры растет по мере увеличения количества импульсов и уменьшения расстояния между индуктором и поверхностью расплава. Получены 10-кратное измельчение дендритов, уменьшение размеров частиц эвтектического Si до 2-5 мкм, увеличение плотности сплава на 9,5 %. Предложена математическая модель, определяющая электродинамические параметры процесса обработки, скорость и равномерность деформации при использовании индукторов с различным количеством витков.*

**Ключевые слова:** магнитоимпульсная обработка, индуктор, электромагнитная сила, дендритная структура, уплотнение, деформация.

*Обґрунтовано та експериментально випробувано метод магнітоімпульсної обробки твердорідкого алюмінієвого сплаву А357 в формі за допомогою плоского індуктора. Встановлено, що ступінь ущільнення і здрібнення дендритної структури зростає із збільшенням кількості імпульсів та зменшенням відстані між індуктором та поверхнею розплаву. Отримано 10-кратне подрібнення дендритів, зменшення розмірів часток евтектичного Si до 2-5 мкм, збільшення густини сплаву на 9,5 %. Запропоновано математичну модель, яка визначає електродинамічні параметри процесу обробки, швидкість та рівномірність деформації за використанням індукторів з різною кількістю витків.*

**Ключові слова:** магнітоімпульсна обробка, індуктор, електромагнітна сила, дендритна структура, ущільнення, деформація.

*The magnetoforming process of semisolid aluminum A357 alloy within the form by means of flat inductor was motivated and experimental tested. It is revealed that degree of the compaction and crushing dendrite structures increase on measure of the increase of pulse amount and reduction of the distance between the inductor and melt surface. 10-times dendrite crushing, reduction of the sizes of the eutectic Si particles up to 2-5  $\mu\text{m}$ , increase of density on 9,5 % were obtained. The mathematical model defining the electrodynamic parameters of the processing, velocity and uniformity to deformation of semisolid alloy it is proposed when inductor with different amount whorl is used.*

**Keywords:** magnetoforming, inductor, electromagnetic force, dendrite structure, compaction, deformation.

### Введение

Типичными примерами использования электромагнитных полей в литейных технологиях являются индукционная плавка металлов и сплавов, плавка особо чистых металлов во взвешенном состоянии, электромагнитное перемешивание в кристаллизаторах при непрерывном литье слитков, обработка расплава в магнитогиродинамических перемешивателях. Возможность оказывать силовое воздействие магнитным полем на сплавы непосредственно в форме пока еще изучается [1, 2], хотя такой способ мог бы стать хорошей альтернативой более сложной и дорогостоящей технологии литья отливок под высоким давлением. Оказывая бесконтактное электромагнитное воздействие на расплав с помощью простых и давно известных устройств (соленоида, навитого поверх формы, или плоского индуктора, размещенного непосредственно над прибыльной частью), можно получать плотные мелкозернистые отливки любой конфигурации в условиях обычного гравитационного литья.

Чтобы препятствовать выделению растворенных газов из расплава в пузырьки, подавлять образование усадочной пористости и рыхлот и, тем более, изменять барометрические условия кристаллизации, требуются поля высокой напряженности ( $H \sim 10^6$  А/м), которые реализуются такими импульсными режимами, например, как использование в магнитоимпульсном формообразовании алюминиевых сплавов в твердом состоянии [3]. Физика этого процесса заключается в том, что импульс тока, протекающий по индуктору, создает переменное магнитное поле, которое индуцирует в обрабатываемом металле вихревые токи, противонаправленные по отношению к току индуктора. Импульс возбуждающего тока формируется за счет разряда батареи конденсаторов, напряжение которой достигает от единиц до нескольких десятков киловольт, что позволяет пропускать через индуктор, соответственно, индуцировать в металле токи килоамперного диапазона. Действием объемных электродинамических сил отталкивания проводников с противонаправленными токами, величина которых прямо пропорциональна значениям токов в проводниках и обратно пропорциональна расстоянию между ними, на обрабатываемый металл оказывается достаточное магнитное давление, чтобы вызвать пластические деформации в твердой фазе, ударные волны и металлопотоки – в жидком расплаве.

Но есть еще одна особенность, характеризующая перспективы магнитоимпульсной обработки (МИО) сплавов в литейной форме, связанная с тем, что металлические сплавы в твердожидком состоянии при определенных условиях способны проявлять свойства тиксотропии и псевдопластичности [4]. Снижение вязкости тиксотропных сплавов под действием сдвиговых нагрузок обеспечивает возможность их плавного течения в полостях литейной формы, что позволило бы получать однородные фасонные отливки без признаков газовой пористости и усадочных дефектов путем магнитоимпульсной запрессовки. Разработка такого технологического процесса требует детального изучения явлений, возникающих в твердожидком металле при воздействии на него магнитного поля высокой напряженности, и поиска эффективных параметров МИО, реализующих необходимые уровни давлений и деформаций в течение дозированного количества импульсов.

*Цель данной работы* – определить влияние параметров индукционной МИО алюминиевого сплава А357 в процессе затвердевания в литейной форме на его уплотнение и измельчение зеренной структуры.

Выбор марки сплава при этом является не случайным. Сплав А357, будучи типичным представителем двухфазных доэвтектических силуминов, давно успешно используется в технологиях рео-, тиксолитья, демонстрируя высокую склонность к деформированию в твердожидком состоянии и потенциал относительного удлинения, превышающий 30 % при одновременном росте предела прочности [5].

Крайне важным является и выбор индукторной системы, которая должна обеспечивать необходимую конфигурацию и амплитудно-частотные характеристики

магнитного поля в жидкометаллическом проводнике – расплаве. Анализируя возможные варианты расположения индуктора, отметим размещение плоского индуктора над поверхностью расплава, расстояние до которой можно регулировать с точностью до 1 мм (напомним, что от этого зависит величина магнитного давления), как наиболее технологичный вариант. Обработка через стенки литейной формы, вызывающая процесс ее разрушения, с этой точки зрения представляется менее технологичным вариантом МИО.

Выбирая температурный интервал МИО, необходимо учитывать специфику выделения и роста первичных кристаллов  $\alpha$ -фазы. Силовое воздействие магнитного поля в отличие от литья под давлением, где весь период затвердевания проходит под стационарной нагрузкой, ограничивается микромилисекундной длительностью импульса, и в паузах между импульсами происходит естественная кристаллизация. Периодическая «встряска», оказываемая на ранних стадиях кристаллизационного процесса, должна как можно дольше предотвращать дендритное ветвление кристаллов  $\alpha$ -фазы, которое резко ухудшает тиксотропные свойства сплава. На завершающем этапе важно препятствовать агломерации и схватыванию дендритов в единый каркас вплоть до тех пор, пока не начнется закупоривание междендритных пространств эвтектической смесью.

### *Результаты экспериментальных исследований*

Для экспериментальных исследований использовали чушки сплава A357 (6,5 Si; 0,01 Mn; 0,005 Mg; 0,1 Cu; 0,018 Zn; 0,48 Fe), которые расплавляли в печи при  $T = 750^\circ\text{C}$  и порционно переливали в цилиндрические толстостенные графитовые формы, предварительно подогретые до  $300^\circ\text{C}$  и установленные на теплоизоляционную подкладку. Внутренний диаметр формы составлял 80 мм, глубина –  $H = 10$  мм, что позволяло получать прессованные диски массой до 60 г. С помощью термопары, погружаемой в форму с расплавом, измеряли температуру, в диапазоне от  $630$  до  $570^\circ\text{C}$ , который соответствует температурному интервалу выделения первичных кристаллов, сплав подвергали МИО. Использовали медный плоский 3-витковый индуктор внешним диаметром  $2R = 70$  мм. Радиус сечения провода составлял  $r_{\text{Cu}} = 2,5$  мм, расстояние между витками индуктора – 5 мм. Расстояние до поверхности расплава  $h$  варьировали в диапазоне от 5 до 10 мм. МИО осуществляли при неизменных электрических параметрах цепи: начальном напряжении  $U_0 = 23$  кВ, емкости конденсатора  $C = 2,5$  мкФ и индуктивности  $L = 2,2$  мкГн. Количество импульсов  $y$  варьировали в пределах от 5 до 20 по схеме, приведенной на рис. 1. Здесь акцентируем внимание на высокие температуры, при которых проходит МИО, и что  $h = 5$  мм – это предельное расстояние, предупреждающее при  $U_0 = 23$  кВ пробой между неизолированным индуктором и металлом (при обработке сплавов в твердом состоянии  $h$  составляло бы не более 1-2 мм).

На основе данных химического и термографического анализов с использованием уравнения Шейла и программы Thermo-Calc параллельно рассчитывали количество твердой фазы, соответствующее конкретному температурному интервалу МИО,

$$v_L = \left[ \frac{T_M - T_L}{T_M - T} \right]^{1-k_0},$$

$$v_L + v_S = 1,$$

где  $v_L$  – доля жидкой фазы;  $v_S$  – доля твердой фазы;  $T_M$  – температура растворителя (алюминия),  $^\circ\text{C}$ ;  $T_L$  – температура ликвидуса,  $^\circ\text{C}$ ;  $k_0$  – равновесный коэффициент распределения.

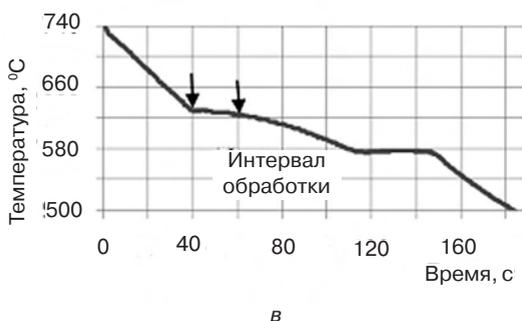
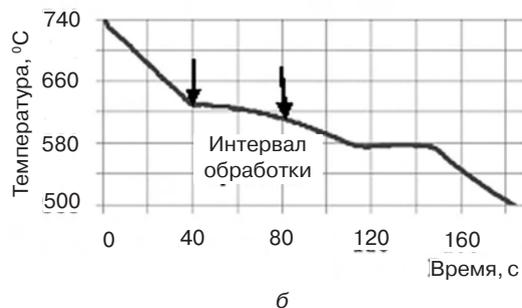
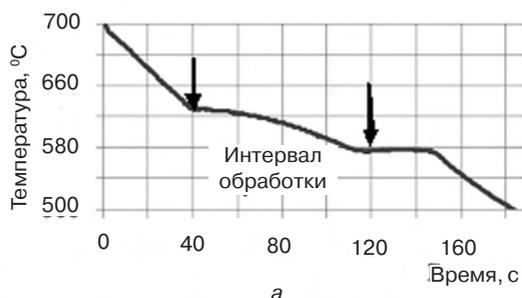


Рис. 1. Температурно-временной интервал МИО: а –  $y = 20$ ; б –  $y = 10$ ; в –  $y = 5$

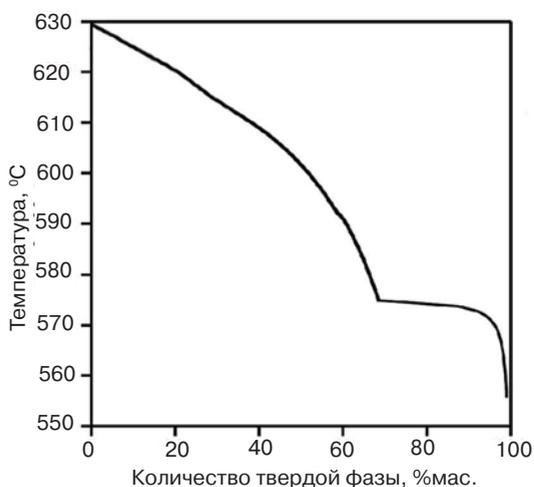


Рис. 2. Изменение доли твердой фазы в сплаве А357

Расчет показал (рис. 2), что обработкой в количестве импульсов  $y = 5$  было охвачено 10 % твердой фазы. Количеством импульсов  $y = 10$  – уже до 30 % твердой фазы, а количеству  $y = 20$  соответствовал температурный интервал от начала кристаллизации до становления дендритного остова.

Фото (рис. 3) показывают, как растет степень измельчения структуры сплава по мере увеличения количества импульсов и уменьшения зазора между индуктором и поверхностью расплава. Видно, что структурное измельчение имеет место даже в том случае, когда доля твердой фазы в сплаве, на которую действовало магнитное поле, была незначительной. Образцы, подвергавшиеся обработке с минимальным зазором во всем интервале образования первичных кристаллов, характеризуются полным отсутствием междендритных пор (в 10 раз) измельченной дендритной структурой и измельченными до микронного размера частицами эвтектического кремния. Структура однородна по диаметру и толщине образцов, что свидетельствует об однородности процесса деформирования, исключая тонкие пристеночные слои, где кристаллизация предшествовала МИО. Каких-либо особенностей структуры в пределах поверхностного скин-слоя, который нагревается наведенными токами наиболее сильно, также не было обнаружено, что подтверждает преимущественно силовое действие МИО на структуру сплава.

По мере уменьшения размеров дендритов, а, значит, и пористых междендритных пространств, увеличивается физическая плотность сплава (рис. 4). Плотность и дисперсность структуры существенно зависят от зазора между индуктором и поверхностью обрабатываемого слитка, что подтверждает необходимость размещать индуктор на минимально возможном расстоянии от формы при данной температуре.

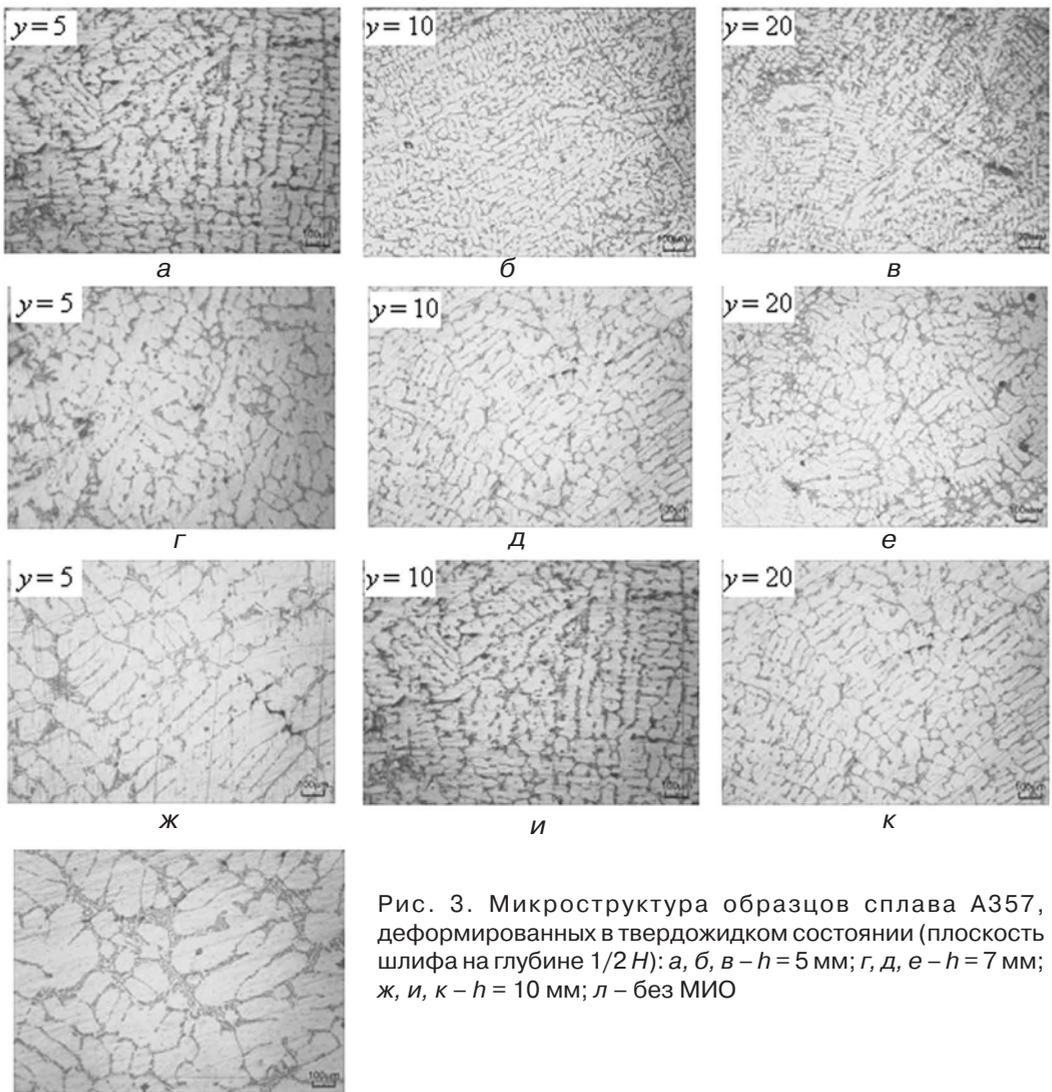


Рис. 3. Микроструктура образцов сплава А357, деформированных в твердожидком состоянии (плоскость шлифа на глубине  $1/2 H$ ): а, б, в –  $h = 5$  мм; г, д, е –  $h = 7$  мм; ж, и, к –  $h = 10$  мм; л – без МИО

л

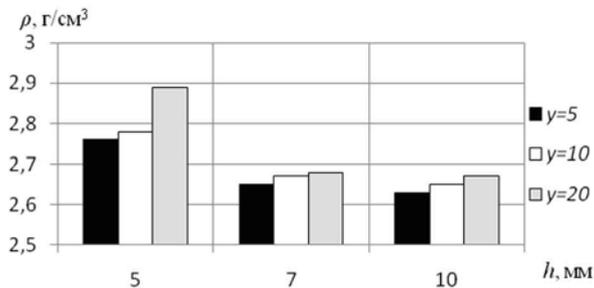


Рис. 4. Изменение плотности сплава А357 при МИО (плотность необработанного сплава –  $2,63 \text{ г/см}^3$ )

*Математическое моделирование электромагнитных процессов обработки*

Для того чтобы оценить, какими уровнями давлений и деформаций получены такие изменения структуры, рассмотрим помещенный над поверхностью расплава индуктор, включенный в разрядную цепь генератора импульсных токов с емкост-

ISSN 0235-5884. Процессы литья. 2012 № 5 (95)

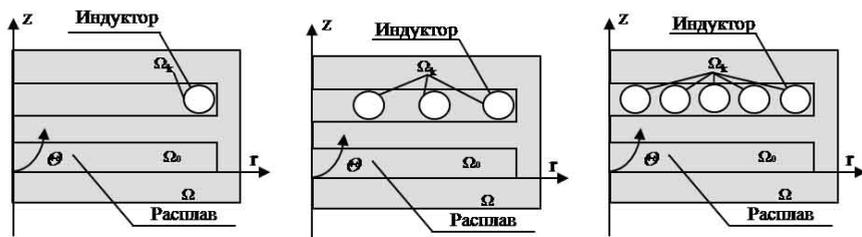


Рис. 5. Геометрическая модель МИО

ным накопителем энергии. На рис. 5 представлен 2-D меридиональный разрез  $\Omega$  такой системы. Твердожидкий проводящий алюминиевый сплав (область  $\Omega_0$ ) находится в непроводящей форме и геометрически подобен диску высотой  $H = 10$  мм и диаметром 70 мм, над которым размещен индуктор (область  $\Omega_s$ ) с переменным количеством витков  $S$  (каждый виток представлен проводящей областью  $\Omega_k$ ), что позволяет использовать для математического описания цилиндрическую систему координат  $(r, \theta, z)$ . Промежуток между поверхностью и плоским индуктором  $h$  свободно варьируется. Подобно экспериментальному случаю, индуктор имеет постоянный наружный диаметр  $2R = 70$  мм и навит из медного провода диаметром  $2r_{Cu} = 5$  мм. Витки индуктора аппроксимируются окружностями. Значение проводимости расплава в интервале температур обработки принимается равным  $\sigma = 3,8 \cdot 10^6$  См/м.

С целью описания электромагнитных процессов, происходящих при МИО, используются уравнения для квазистационарного электромагнитного поля.

$$\operatorname{rot} H = J; \quad (1)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \operatorname{rot} E = 0; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} B = 0; \quad (3)$$

$$\operatorname{div} D = 0, \quad (4)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $J$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $E$  – напряженность электрического поля, А/м;  $B$  – индукция магнитного поля, Тл;  $D$  – электрическая индукция, Кл/м.

Каждый элемент области  $\Omega$  характеризуется своей плотностью тока, определяемой из выражения

$$J = \begin{cases} \sigma E + \sigma v \times B; & \text{в } \Omega \setminus \Omega_s, \\ J_s; & \end{cases} \quad (5)$$

где  $v$  – скорость расплава, м/с;  $J_s$  – плотность тока возбуждения, протекающего по индуктору с количеством витков  $S$ , А/м<sup>2</sup>.

Учитывая, что  $\operatorname{div} B = 0$ , в дальнейших расчетах можно использовать векторный магнитный потенциал  $A$  ( $B = \operatorname{rot} A$ ), который в осесимметричной системе так же, как магнитное поле и плотность, будет иметь одну только тангенциальную компоненту  $A_\theta$ :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu} \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) = J_\theta; \quad (6)$$

$$J_{\theta} = \begin{cases} \sigma \left( \frac{\partial A_{\theta}}{\partial t} \right) - v_r \frac{1}{r} \frac{\partial A_{\theta}}{\partial r} - v_z \frac{\partial A_{\theta}}{\partial z}; \text{в } \Omega \setminus \Omega_s, \\ J_{\theta}^s \end{cases} \quad (7)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость.

Объемная электромагнитная сила, действующая на расплав  $F_{эм}$ , и плотность наведенного тока  $J_{ind}$  определяются следующими выражениями:

$$F_{эм} = J_{ind} \times B; \quad (8)$$

$$J_{ind} = -\sigma \left( \frac{\partial A_{\theta}}{\partial t} \right). \quad (9)$$

Соответствующая нормальная компонента магнитного давления  $P_{эм}$  определяется путем интегрирования по глубине скин-слоя  $\Delta$

$$P_{эм} = \int_{z=0}^{z=\Delta} F_{эм} dz; \quad (10)$$

$$\Delta = (1/\mu_0 \mu \sigma \omega_k)^{-1/2}, \quad (11)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\omega_k$  – круговая частота импульса тока, рад  $\cdot$  с $^{-1}$ .

Закон изменения силы тока, протекающего по индуктору, зададим в виде затухающей синусоиды, которая адекватно описывает колебательный характер разрядного импульса

$$I_{\theta}^s(t) = \frac{U_0}{\sqrt{L/C}} \cdot e^{(-\frac{R_k}{ZL})t} \cdot \sin(\omega_k \cdot t), \quad (12)$$

где  $R_k$  – активное сопротивление разрядного контура, Ом. При этом множителем  $U_0 / \sqrt{L/C} = I_{max}^s$  задается максимальное амплитудное значение силы возбуждающего тока в импульсе.

За счет давления  $P_{эм}$  в расплаве возникнет деформация объемного сжатия  $\varepsilon$ , значение которой можно оценить как

$$\varepsilon = P_{эм} / K, \quad (13)$$

где  $K$  – коэффициент объемного сжатия расплава (величина, обратная сжимаемости). Здесь принято допущение, что стенки формы абсолютно жесткие и для алюминия вблизи температуры плавления по данным работы [6]  $K = 4,5 \cdot 10^{10}$  Па. Значение скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$  можно оценить по формуле

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2 \cdot P_{эм}}{K \cdot \pi \sqrt{LC}}. \quad (14)$$

Волновая картина в расплаве будет зависеть от соотношения высоты расплава в форме  $H$  и характерной длины волны  $\lambda$ . Заметим, что распространение в глубину расплава волны от поршня, который имеет средний радиус  $R$ , а в поперечнике представляет полосу величины  $2r_{Cu}$ , будет осуществляться в некоторой области, ограниченной углом  $\sim 60^\circ$ . Достигнув жесткого дна, волна отразится, не изменив знак. В случае высоты расплава в форме  $H < \lambda$ , получим ситуацию, когда весь объем расплава определенное время будет находиться в состоянии квазистатического сжатия. Оценки показывают, что использованным в эксперименте параметрам соответствует условие  $H \approx \lambda$ . Математическое описание такого состояния расплава сопряжено с определенными трудностями, поэтому вклад волн давления в изменение его состояния в рамках работы не рассматривается.

**Индуктивность разрядного контура и максимум импульса тока, протекающего по индуктору с различным количеством витков, при  $C = 2,5$  мкФ и  $U_0 = 23$  кВ**

$S$	$L$ , мкГн	$I_{max}^s$ , кА
1	1,2	33
3	2,2	26
5	4,1	20

Используя данные таблицы и решая уравнения (6)-(14) численно в пакете мультифизического моделирования Femlab, определим значения силы  $F_{эм}$ , давления  $P_{эм}$  и скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  с учетом влияния высоты размещения индуктора над поверхностью и количества витков.

На рис. 6-7 представлены данные для момента времени, соответствующего первому максимуму разрядного тока. Видно, что в случае близости индуктора к поверхности при  $h = 1$  мм магнитоимпульсное воздействие локализуется в области расплава, расположенной непосредственно под витками индуктора. С увеличением расстояния

между индуктором и поверхностью обработке подвергается большая поверхность расплава, то есть обработка осуществляется более равномерно, но при этом, естественно, уменьшаются числовые значения параметров деформирования.

Амплитудные значения объемной электромагнитной силы, давления, скорости деформации уменьшаются с уменьшением количества витков индуктора. Так, электромагнитная сила, создаваемая 5-витковым индуктором, в 2 раза больше силы 3-виткового индуктора и в 14 раз – 1-виткового. Примерно также соотносятся значения давления и скорости деформации. Таким образом, для эффективного и равномерного деформирования сплава необходимо иметь индуктор с максимально возможным количеством плотно прилегающих друг к другу количеством витков. Подход к выбору того или иного типа индуктора, естественно, должен учитывать его термическую устойчивость, так как при протекании килоамперных токов имеет место разогрев индуктора до высоких температур, что ограничивает возможность увеличения количества витков за счет уменьшения сечения токовода.

Расчеты показывают, что набором  $U_0 = 23$  кВ,  $C = 2,5$  мкФ,  $h = 5$  мм, который позволил экспериментально получить с помощью 3-виткового индуктора самые большие изменения структуры сплава А357, были реализованы значения  $P_{эм} = 0,3$  МПа и  $\dot{\epsilon} = 3$  с<sup>-1</sup>. Эти параметры заметно меньше, чем параметры статического сжатия, которые используются в машинах литья под давлением (100-500 МПа). Например, в процессе тиксоштамповки твердожидкой суспензии сплава А357 (согласно [6]) необходимо реализовать сдвиговые деформации со скоростью  $\dot{\epsilon}$  от 10 с<sup>-1</sup> при начальном давлении запрессовки в несколько МПа и конечном – в 100-200 МПа. Поэтому очевидно, что роль такого дополнительно воздействующего на металл фактора, как волны давления в процессе МИО, действие которых не учитывалось в рамках данной работы, является столь же значимой, как и роль прямого силового воздействия магнитного поля.

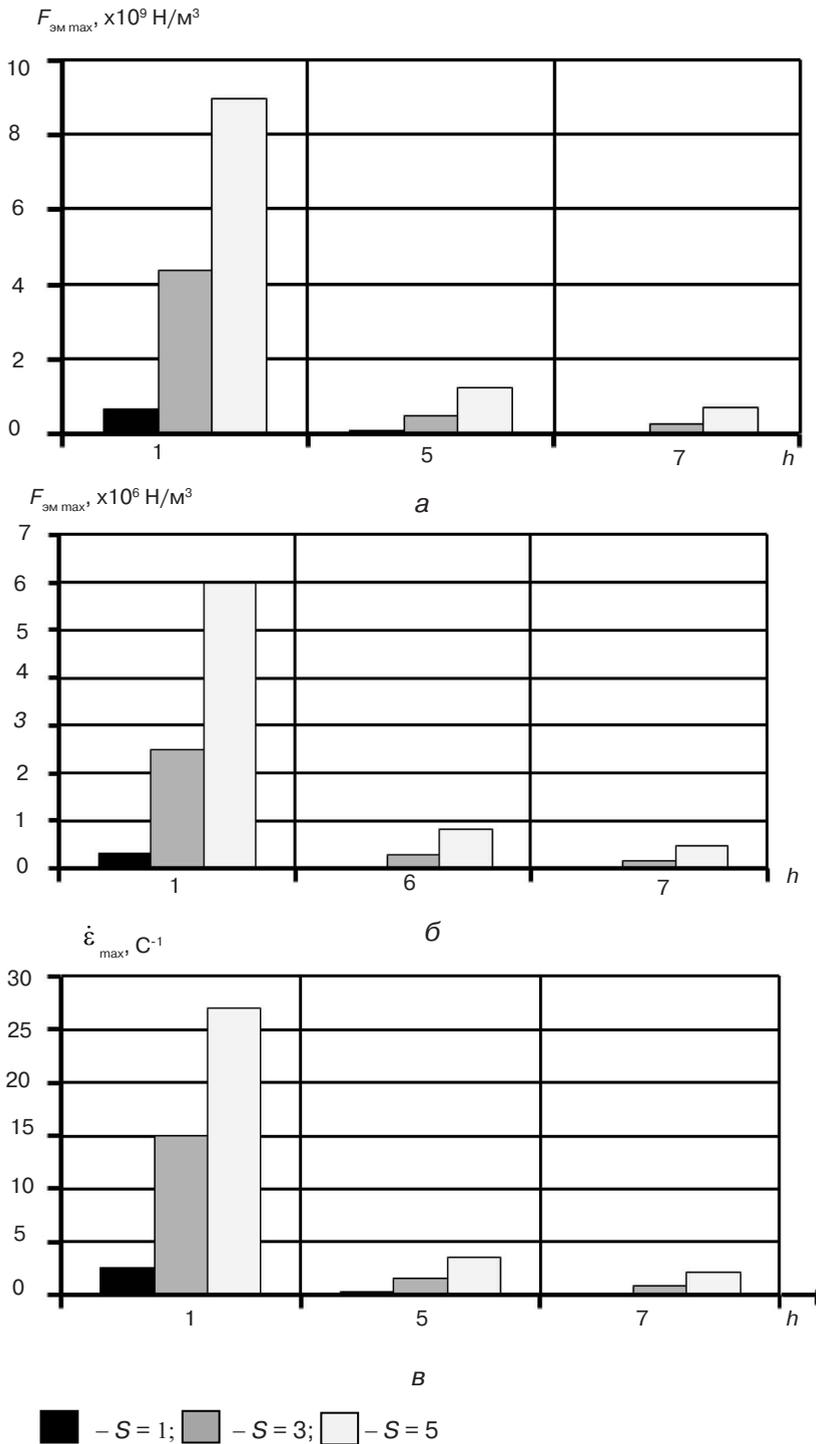


Рис. 6. Параметры МИО в момент времени, соответствующий первому максимуму разрядного тока, в зависимости от высоты размещения индуктора над поверхностью и количества витков: а – объемная электромагнитная сила; б – магнитное давление; в – скорость деформации

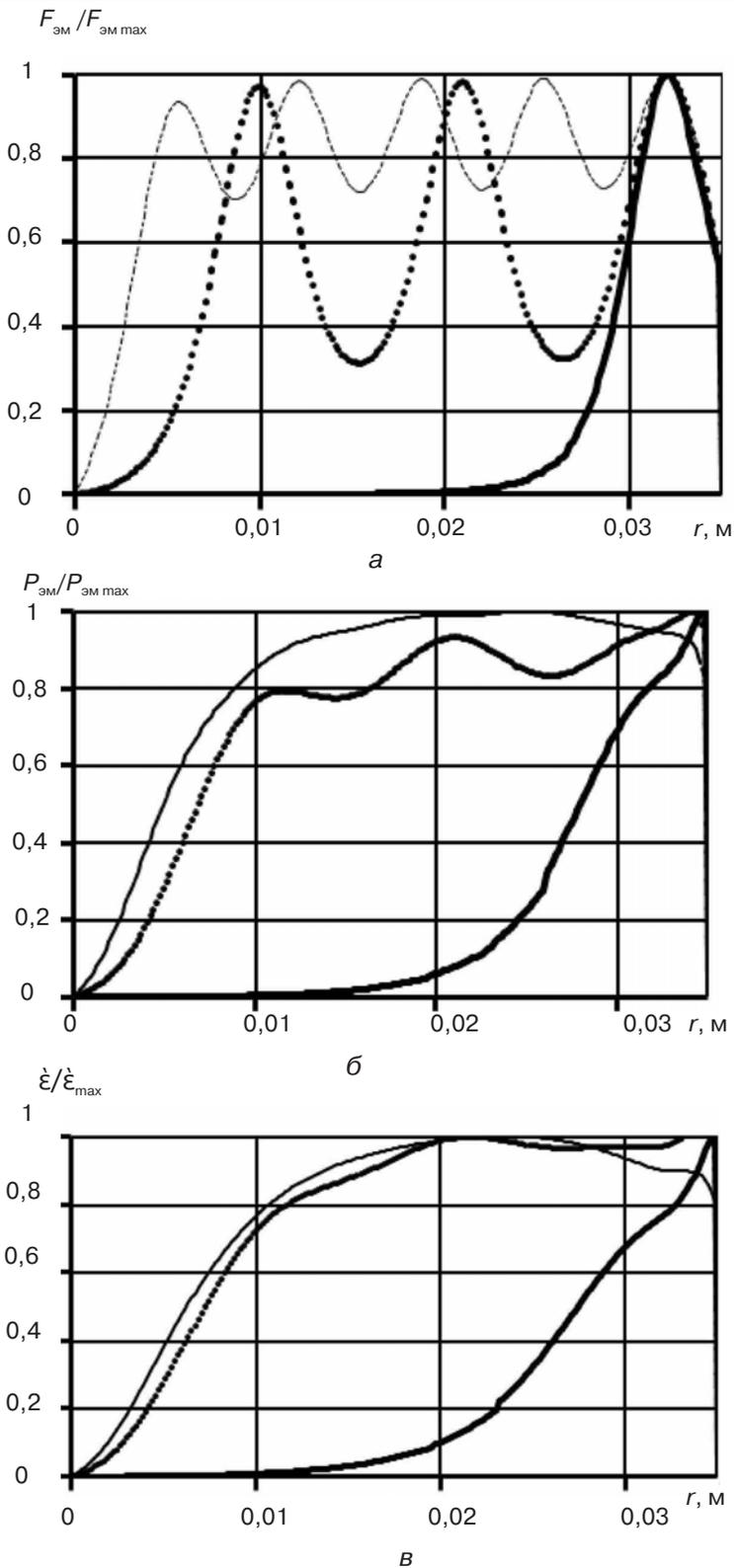


Рис. 7. Распределение параметров МИО по радиусу слитка в зависимости от количества витков индуктора: а – относительная объемная электромагнитная сила; б – относительное магнитное давление; в – относительная скорость деформации

### Выводы

Экспериментальные исследования показывают, что импульсное магнитное воздействие, оказываемое на сплав А357 во время затвердевания, обеспечивает уплотнение, измельчение дендритной структуры и устранение усадочных дефектов. Наиболее благоприятное изменение структуры соответствует случаю, когда сплав подвергается МИО во всем температурном интервале выделения первичной фазы. Бесконтактный принцип обработки магнитными полями в широком диапазоне значений напряженности и длительности, который реализует не только механические деформации, но и сопровождается распространением волн сжатия в металле, может быть использован в процессах жидкой и твердожидкой штамповки плотных беспористых отливок.



### Список литературы

1. Влияние импульсного магнитного поля высокой напряженности на свойства жидких алюминиевых сплавов / В. А. Глушцов, Ф. В. Гречников, В. И. Никитин и др. // Литейщик России. – 2010. – № 7. – С. 34-39.
2. Черников Д. Г. Повышение эффективности процессов литья при производстве деталей двигателей летательных аппаратов путем воздействия импульсного магнитного поля на расплав: Автореф. дис. . . . канд. техн. наук. – Самара, 2010. – 16 с.
3. Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // Электротехника и электромеханика. – 2004. – № 2. – С. 80-84.
4. Flemings M. C. Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State / M. C. Flemings // Metallurgical Transactions A. – 1991. – Vol. 22 A. – P. 957-981.
5. Kazakov A. A. Alloy Compositions for Semisolid Forming // Advanced Materials Processes. – 2000. – Vol. 157, № 3. – P. 31-34.
6. Семенов Б. И., Куштаров К. М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 223 с.

Поступила 21.06.2012

### Вниманию авторов!

*Все статьи, поступающие в редакции научных журналов, должны обязательно проходить рецензирование, иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.*

*Статьи в редакции поступают как на бумажном, так и электронном носителе. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.*