

# Моделирование процесса магнитно-импульсной обработки твердожидких металлических суспензий

А. В. Синчук, А. В. Иванов, А. С. Рубан

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [iipf@iipf.com.ua](mailto:iipf@iipf.com.ua)*

Предложена математическая модель, определяющая характеристики процесса магнитно-импульсной обработки твердожидкой суспензии алюминиевого сплава А357 при использовании индукторов с различным количеством витков. Установлено, что при минимально допустимом зазоре между индуктором и поверхностью высокотемпературной суспензии в 5 мм процесс ее течения в полости литейной формы реализуется импульсами разрядного тока силой не менее 35 кА, а максимальные значения давления, которые обеспечивают сжатие и уплотнение металла, – импульсами в 110 кА и более. При этом скорость деформации, зависящая от силы и частоты тока в импульсе, ограничивается несколькими десятками  $\text{с}^{-1}$ .

*Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, моделирование, твердожидкая суспензия, индуктор, электромагнитная сила, деформация.*

УДК 537.528: 669.017.16

## ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие электромагнитного поля с металлами наиболее полно изучено применительно к магнитно-импульсной обработке (МИО) давлением, к которой относятся тонколистовая штамповка деталей, развальцовка труб, вытяжка лент и т.п. [1–3]. Вместе с тем высокая эффективность и экологичность импульсных методов, которые реализуют режим мощного силового воздействия на металл в микросекундном временном интервале, расширяют сферу успешного использования МИО, например для упрочнения металлических изделий [4], притяжения вмятин [5], внепечной обработки металлических расплавов [6].

Процессы взаимодействия электромагнитного поля с металлами, а точнее, со сплавами в твердожидком состоянии, из которых путем тиксоштамповки изготавливают отливки, до сих пор вообще не изучались. Такие твердожидкие металлические суспензии – с долей твердой фазы менее 0,8 и с глобулярной формой кристаллов – обычно обладают двумя реологическими свойствами: тиксотропностью и псевдосверхпластичностью. Эффект тиксотропии заключается в том, что при приложении сдвиговой нагрузки суспензии разжижаются до вязкости менее 1 Па·с и свободно текут, заполняя самые труднодоступные полости литейной формы. Псевдосверхпластичность проявляется в вытягивании кристаллов в направлении сдвига и залечивании межкристаллитных пустот, что в конечном итоге способствует образованию плотных мелкокристаллических отливок без признаков газовой пористости и усадочных дефектов. Для получения отливки традиционно подготовленную порцию

суспензии вначале помещают в машину литья под давлением, затем с помощью пуансона «заталкивают» в литейную форму. Использование магнитно-импульсной штамповки, которая оказывает бесконтактное воздействие на металл, позволило бы существенно упростить этот технологический процесс, а именно: осуществлять запрессовку суспензии непосредственно в металлической форме с помощью индуктора, размещенного над ее поверхностью, избегая налипания металла на рабочий инструмент.

Однако отсутствие рекомендаций по выбору как электротехнических, так и технологических параметров обработки твердожидких металлических суспензий не дает возможности полностью оценить перспективы и реализовать потенциал данного способа. Например, если при механической штамповке действенность пуансона непосредственно не связана с внутренними процессами в обрабатываемом металле, то эффективное магнитно-импульсное силовое действие физически возможно только в случае сбалансированного сочетания электротехнических и геометрических параметров системы «импульсный источник энергии – индуктор – металлическая суспензия». Это взаимодействие служит источником возникновения необходимых по амплитудно-временным характеристикам подемоторных сил, которые в свою очередь являются источником эффективных сдвиговых деформаций в металле. Поэтому изучение электродинамических процессов взаимодействия между индуктором-инструментом и высокотемпературной суспензией, подлежащей обработке, является актуальной научной задачей.

Цель данной работы – путем математического моделирования МИО твердожидкого алюми-

вого сплава определить зависимости характеристик процесса магнитно-импульсного деформирования металлических суспензий от электротехнических и геометрических параметров системы «импульсный источник энергии – индуктор – металлическая суспензия».

При этом под характеристиками процесса деформирования будем понимать действующие на суспензию электромагнитные силы, возникающие давления и скорости деформации; под электротехническими и геометрическими параметрами системы – геометрию индуктора, расстояние до обрабатываемой поверхности и электрические параметры разрядной цепи, в которую включен индуктор.

### ОСОБЕННОСТИ МИО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СУСПЕНЗИЙ

Главной отличительной особенностью процесса являются высокие температуры, при которых металлы (сплавы) находятся в твердожидком состоянии. Например, для алюминиево-кремниевых сплавов – температуры порядка 570–600°C, что накладывает ограничения на расстояние до индуктора и рабочее напряжение. Если при МИО твердых металлов зазор между индуктором и обрабатываемой поверхностью можно свести до 1–2 мм, то при МИО высокотемпературных суспензий расстояние, которое исключит случайное налипание горячей суспензии на индуктор, должно быть как минимум 5 мм. Соответственно из-за повышенной температуры окружающей среды при МИО суспензий предельно допустимое напряжение, исключающее пробой между поверхностью и индуктором, будет меньше, чем при МИО твердых металлов.

Высокая температура суспензии служит и источником дополнительного нагрева индуктора, который сам по себе разогревается из-за протекания возбуждающего импульса тока. Импульс формируется за счет разряда батареи конденсаторов, напряжение которой – от единиц до нескольких десятков киловольт, что позволяет пропускать через индуктор, соответственно индуцировать в металле токи килоамперного диапазона. Таким образом, температурный фактор необходимо учитывать, выбирая геометрические параметры индукторной системы, которая должна обеспечивать необходимую конфигурацию и амплитудно-частотные характеристики магнитного поля в твердожидком металлическом проводнике и быть достаточно жесткой при высоких температурах.

Вторая отличительная особенность МИО суспензий – наличие жидкой фазы, что делает более разнообразными действующие механизмы обработки. Помимо сдвиговых деформаций и волн

давления, которые присущи МИО твердых металлов, в суспензиях во время обработки могут развиваться металлопоток и различные акустические явления, включая кавитацию жидкости. Предполагая главенствующую роль сдвигового механизма, совокупность этих дополнительных явлений также необходимо учитывать.

Еще одна особенность процесса – отсутствие на сегодняшний день каких-либо обозначенных рекомендаций относительно эффективных параметров магнитно-импульсного деформирования металлических суспензий. Должны ли они быть соизмеримыми с параметрами статического сжатия, которые используются в машинах литья под давлением? Например, в процессе тиксоштамповки твердожидкой суспензии сплава А357, согласно [7], необходимо реализовать сдвиговые деформации со скоростью от  $10 \text{ с}^{-1}$  при начальном давлении запрессовки до 10 МПа, которое обеспечивает ламинарное течение суспензии. Конечное же давление, под которым штамповка полностью затвердевает, должно быть увеличено как минимум до 50 МПа для устранения газовой пористости и других дефектов структуры. Моделируя в рамках данной работы процесс МИО сплава А357, будем ориентироваться на эти технологические показатели, так как окончательный ответ на вышепоставленный вопрос может дать только эксперимент.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИО

Рассмотрим помещенный над поверхностью обрабатываемой суспензии индуктор, включенный в разрядную цепь генератора импульсных токов с емкостным накопителем энергии. На рис. 1 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 применить для математического описания цилиндрическую систему координат  $(r, \theta, z)$ . Промежуток между поверхностью и плоским индуктором  $h$  свободно варьируется. Индуктор имеет постоянный наружный диаметр  $2R = 70$  мм и навит из медного провода диаметром  $2r_{Cu} = 5$  мм. Витки индуктора моделируются окружностями. Значение проводимости  $\sigma$  металлической суспензии принимается равным  $3,8 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ .

Для описания электромагнитных процессов, протекающих при МИО, используются уравнения Максвелла для квазистационарного электромагнитного поля:

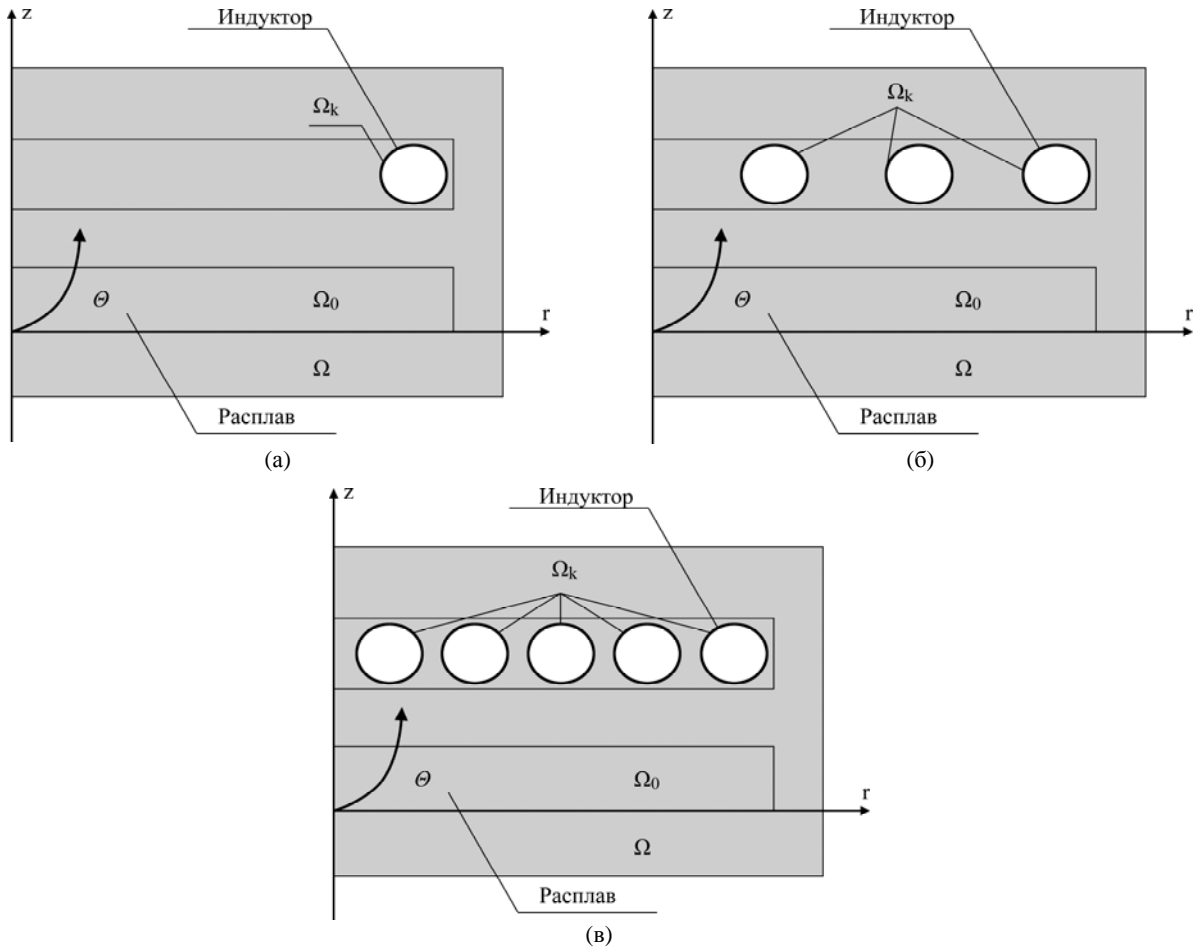


Рис. 1. Геометрическая модель МИО.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \text{rot} \vec{E} = 0; \quad (1)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0; \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{D} = 0, \quad (3)$$

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

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

$$\vec{J} = \begin{cases} \sigma \vec{E} + \sigma \vec{v} \times \vec{B}; & \text{в } \Omega / \Omega_S, \\ \vec{J}_S; & \text{в } \Omega_S, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\vec{v}$  – скорость расплава, м/с;  $\vec{J}_S$  – плотность тока возбуждения, протекающего по индуктору с количеством витков  $S$ , А/м<sup>2</sup>.

Учитывая, что  $\text{div} \vec{B} = 0$ , в дальнейших расчетах можно использовать векторный магнитный потенциал  $\vec{A}$  ( $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$ ), который в осесимметричной системе так же, как магнитное поле и плот-

ность, будет иметь одну только тангенциальную компоненту  $A_\theta$ :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu} \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{A}_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}_\theta}{\partial z} \right) = \vec{J}_\theta, \quad (5)$$

$$\vec{J}_\theta = \begin{cases} \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}_\theta}{\partial t} \right) - \vec{v}_r \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{A}_\theta}{\partial r} - \vec{v}_z \frac{\partial \vec{A}_\theta}{\partial z}; & \text{в } \Omega / \Omega_S, \\ \vec{J}_\theta^S; & \text{в } \Omega_S, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость.

Объемная электромагнитная сила, действующая на расплав  $\vec{F}_{эм}$ , и плотность наведенного тока  $\vec{J}_{ind}$  определяются выражениями

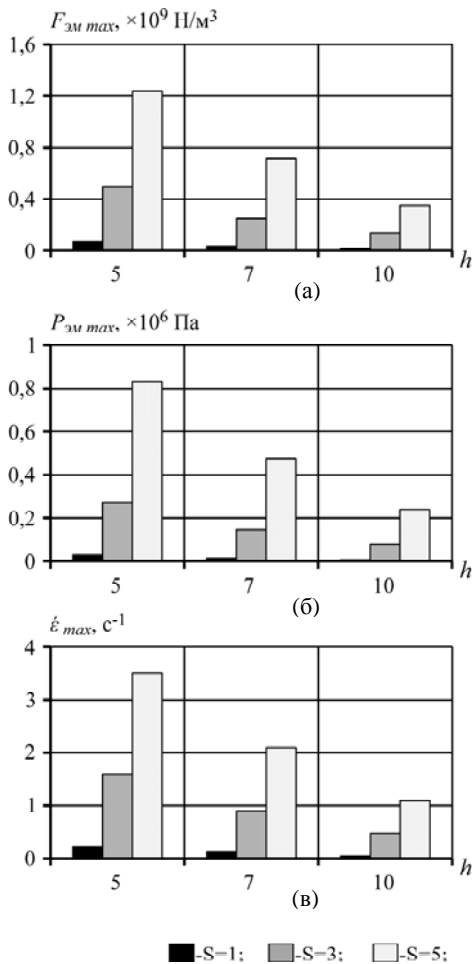
$$\vec{F}_{эм} = \vec{J}_{ind} \times \vec{B}, \quad (7)$$

$$\vec{J}_{ind} = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}_\theta}{\partial t} \right). \quad (8)$$

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

$$P_{эм} = \int_0^\Delta F_{эм} dz, \quad (9)$$

$$\Delta = (1 / \mu_0 \mu \sigma \omega_k)^{-1/2}, \quad (10)$$



**Рис. 2.** Характеристики процесса 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.

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

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

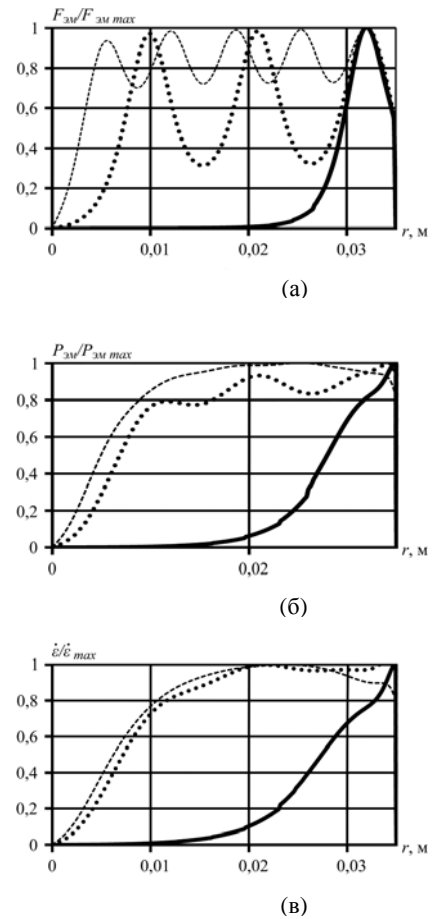
$$I_0^s(t) = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \cdot e^{-\left(\frac{R_k}{2L}\right)t} \cdot \sin(\omega_k \cdot t), \quad (11)$$

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

За счет давления в расплаве возникнет деформация объемного сжатия  $\epsilon$ , значение которой можно оценить как

$$\epsilon = P_{эм} / K, \quad (12)$$

где  $K$  – коэффициент объемного сжатия расплава (величина, обратная сжимаемости). Здесь приня-

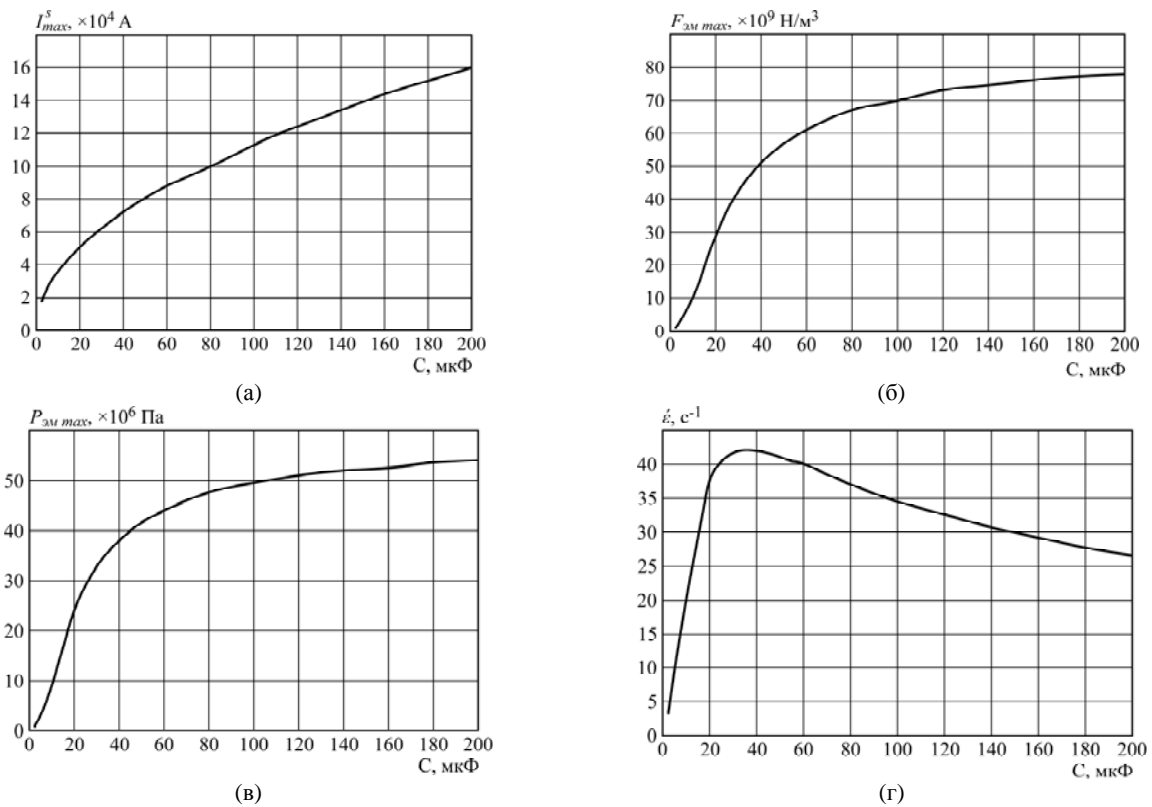


**Рис. 3.** Распределение по радиусу слитка в зависимости от количества витков индуктора: (а) – относительная объемная электромагнитная сила; (б) – относительное магнитное давление; (в) – относительная скорость деформации.

то допущение, что стенки формы абсолютно жесткие и для алюминиевой суспензии, по данным [8],  $K = 4,5 \cdot 10^{10}$  Па. Значение скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  можно оценить по формуле

$$\dot{\epsilon} = \frac{2 \cdot P_{эм}}{K \cdot \pi \sqrt{LC}}. \quad (13)$$

Волновая картина в расплаве будет зависеть от соотношения высоты  $H$  расплава в форме и характерной длины волны  $\lambda$ . Заметим, что распространение в глубь расплава волны от такого «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  $H < \lambda$  мы получим ситуацию, когда весь объем расплава определенное время будет находиться в состоянии квазистатического сжатия. Математическое описание такого состояния расплава сопряжено с определенными трудностями, поэтому вклад волн давления в изменение его состояния, равно как и других



**Рис. 4.** Влияние емкости на максимальные значения характеристик процесса деформирования ( $S = 5$ ;  $h = 5$  мм): (а) – ток; (б) – объемная электромагнитная сила; (в) – магнитное давление; (г) – скорость деформации.

дополнительных механизмов, в рамках работы не рассматривается.

Задаваясь постоянным значением  $U_0 = 23$  кВ (максимально допустимое напряжение при  $h = 5$  мм) и для начала небольшим значением  $C = 2,5$  мкФ, используя данные таблицы и решая уравнения (6)–(13) численно в пакете мультифизического моделирования Femlab, определим значения силы  $F_{\text{эм}}$ , давления  $P_{\text{эм}}$  и скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  с учетом влияния высоты размещения индуктора над поверхностью и количества его витков.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Данные рис. 2 и 3 представлены для момента времени, соответствующего первому максимуму разрядного тока. Можно видеть, что расстояние между индуктором и поверхностью обрабатываемой суспензии очень сильно влияет на характеристики процесса МИО. В случае близости индуктора к поверхности магнитно-импульсное воздействие локализуется в области, расположенной непосредственно под витками индуктора. С увеличением расстояния между индуктором и поверхностью обработке подвергается большая площадь, то есть обработка осуществляется более равномерно, но при этом, естественно, уменьшаются числовые значения действующих сил и давлений.

Амплитудные значения объемной электромагнитной силы, давления, скорости деформации

уменьшаются и с уменьшением количества витков индуктора. Так, электромагнитная сила, создаваемая пятивитковым индуктором, в 2 раза больше силы трехвиткового индуктора и в 14 раз – одновиткового. Примерно так же соотносятся значения давления и скорости деформации. Таким образом, для эффективного и равномерного деформирования суспензии 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.

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

$S$	$L$ , мкГн	$I_{\text{max}}^s$ , кА
1	1,2	33
3	2,2	25
5	4,1	18

Расчеты показывают, что набором  $U_0 = 23$  кВ,  $C = 2,5$  мкФ,  $h = 5$  мм реализуются значения  $P_{\text{эм max}} \approx 0,8$  МПа и  $\dot{\epsilon}_{\text{max}} \approx 3,5 \text{ c}^{-1}$ . Эти значения заметно меньше, чем характеристики статического сжатия, которые реализуются в машинах литья

под давлением, поэтому необходимость наращивания силы тока в импульсе очевидна. И сделать это в силу существующего ограничения по напряжению можно, только увеличивая емкость конденсатора, без опасений, как в случае обработки тонкостенных твердых материалов, чрезмерно понизить частоту разрядного тока (речь идет о том, что толщина слоя обрабатываемой суспензии всегда гораздо больше толщины проникновения в нее магнитного поля).

Рассматривая зависимости, представленные на рис. 4, можно видеть, что максимальные значения давления на суспензию, под действием которого начинается процесс течения, реализуются, если сила тока в импульсе повышается до 35 кА, а максимальные значения давления, которые обеспечивают сжатие и уплотнение металла, реализуются, когда сила тока в импульсе достигает 110 кА и более. При этом увеличение емкости свыше 100 мкФ очень слабо влияет на рост магнитного давления, так как одновременно с увеличением силы тока в возбуждающем импульсе увеличивается толщина скин-слоя суспензии, в котором протекает наведенный ток (при  $C = 2,5$  мкФ она составляет порядка 1 мм, при  $C = 200$  мкФ – порядка 3,5 мм). Что касается скорости деформаций, то здесь также обнаруживается интересная особенность, связанная с существованием максимума в точке  $C = 35$  мкФ. Если в машинах литья под давлением скорость сдвига зависит только от линейной скорости перемещения поршня и может изменяться в пределах от  $10^1$  до  $10^3$  с<sup>-1</sup>, то в случае МИО она является взаимосвязанной с электрическими параметрами цепи, в частности с частотой тока, и ограниченной несколькими десятками с<sup>-1</sup>.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом результаты проведенного моделирования свидетельствуют о применимости магнитно-импульсного метода для тиксоштамповки металлических суспензий. Необходимые для получения качественных штамповок (отливок) силы, давления и скорости деформации могут быть реализованы существующими магнитно-импульсными установками энергоемкостью 30–50 кДж. Единственная техническая проблема, которую необходимо будет решить при экспериментальном опробовании метода, – постоянство минимально допустимого зазора между индуктором и поверхностью «текущей» суспензии от импульса к импульсу за счет вертикального перемещения индуктора в полости литникового хода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов. *Электротехника и электромеханика*. 2004, (2), 80–84.
2. Pasca S., Fireteanu V. FEM Analysis of Transient Electromagnetic in Magnetoforming Processes. *12 International Conference on Nonconventional Technologies: ICNcT*, 2005, 2, 67–74.
3. Takatsu N., Kato M., Sato K., Tobe T. High Speed Forming of Metal Sheets by Electromagnetic Force. *Japan Society Mechanical Engineering Institute Journal*. 1988, 31(1), 142–158.
4. Алифанов А.В., Благодарный В.М., Лях А.А. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий. *Современные наукоемкие технологии*. 2010, (2), 22–25.
5. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. *Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. Т.3.: Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий*. Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2009. 240 с.
6. Глущенков В.А., Гречников Ф.В., Никитин В.И., Черников Д.Г., Иголкин А.Ю., Никитин К.В., Поздняков А.А. Влияние импульсного магнитного поля высокой напряженности на свойства жидких алюминиевых сплавов. *Литейщик России*. 2010, (7), 34–39.
7. Семенов Б.И., Куштаров К.М. *Производство изделий из металла в твердотелом состоянии. Новые промышленные технологии*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 223 с.
8. Харьков Е.И., Лысов В.И., Федоров В.Е. *Физика жидких металлов*. Киев: Вища школа, 1979. 248 с.

Поступила 10.10.12

#### Summary

A mathematical model is proposed to determine characteristics of the magnetic-pulse processing for semisolid aluminum alloy A357 suspension, when inductors with different amount of turns are used. It is revealed that under a minimal possible gap of 5 mm between the inductor and the surface of a high Tc suspension the flow in cavities of the foundry form is realized with the discharge current of 35 kA, at least, and the maximum pressure that provides the compression and compaction of the metal is realized with pulses of 110 kA and more. The shear rate that depends on the current and pulse frequency is confined within several tens of s<sup>-1</sup>.

*Keywords: magnetic-pulse processing, simulation, semisolid suspension, inductor, electromagnetic force, deformation.*