

- 11 Физические величины. Справочник под редакцией И.С.Григорьева и Е.З.Мейлихова. М., Энергоатомиздат, 1991.
- 12 Справочник. Авиационные материалы. Под ред. Р.Е.Шалина. М.ОНТИ-ВИАМ. 1982. Т.6.
- 13 V.A.Pushkov, S.A.Novikov, V.A.Sinitsyn, I.N.Govorunov Deformation of aluminum alloys AD-1, AMg-6 and D-16 at dynamic compression and temperatures of 25-250°C // Journal Phys. IV. France (DYMAT-2003), 2003, 110, pp. 135-140.
- 14 Справочник. Авиационные материалы. Под ред. Р.Е.Шалина. М.ОНТИ-ВИАМ. 1982. Т.4.

## ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА МАГНИТНОГО ПОЛЯ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Ю.Б. Кудасов<sup>1,2</sup>, И.В. Макаров<sup>2</sup>, В.В. Платонов<sup>1,2</sup>, О.М. Сурдин<sup>1,2</sup>, Д.А. Маслов<sup>1,2</sup>,  
Р.В. Козабаранов<sup>1,2</sup>, А.С. Коршунов<sup>2</sup>, Е.Я. Попов<sup>1</sup>, А.С. Светлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

<sup>2</sup>РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Исследуется динамическая деформация листовых магнитных и немагнитных заготовок под действием импульса магнитного поля, соответствующего режиму обратной электромагнитной формовке. Импульс магнитного поля состоит из медленно меняющегося первичного импульса и последовательности коротких импульсов противоположной полярности. Быстрое движение заготовки индуцирует дополнительную электродвижущую силу в индукторе и существенно изменяет форму импульса тока. Показано, что давления Лоренца и намагниченности имеют разное распределение по поверхности заготовки, что приводит к сложному изгибу под действием импульсного магнитного поля.

### 1. Введение

Импульсное магнитное поле индуцирует вихревые токи в проводящей среде. Их взаимодействие вызывает силу Лоренца, которая может быть достаточной, чтобы вызвать высокоскоростную пластическую деформацию в листовых или трубчатых заготовках [1,2]. Это явление лежит в основе технологии электромагнитного формования (EMF), которая нашла широкое применение в автомобильной и аэрокосмической промышленности. Традиционный процесс EMF производит в основном отталкивающее взаимодействие между индуктором и заготовкой вследствие закона Ленца [1,2]. Однако в определенных условиях можно достичь противоположного эффекта - силы притяжения и деформации заготовки в сторону индуктора [3-5] - обратное электромагнитное формирование (BEMF). Этот метод полезен для некоторых технологических операций, таких как удаление вмятин с корпусов самолетов и автомобилей [3].

Один из подходов, реализующих BEMF, состоит в комбинации медленно меняющегося первичного тока и короткий вторичный импульс противоположной полярности в индукторе [3]. В этом случае взаимодействие магнитного поля, создаваемого первичным током и вихревыми токами, вызванными коротким вторичным импульсом в заготовке, приводит к силе притяжения. Эта технология была применена для удаления вмятин с алюминиевых корпусов самолетов [3]. Чтобы распространить ее на стальные кузова автомобилей, было предложено генерировать последовательность коротких импульсов противоположной полярности вместо одного [6,7]. Было показано, что вторичный ток в форме многократных импульсов представляет собой перспективный подход к BEMF для тонких листовых заготовок с низкой проводимостью, то есть из стали.

Различные экспериментальные методы применяются для исследования динамических деформаций заготовки под действием силы Лоренца. Деформация измеряется волоконными

брэгговскими решетками [8] и тензодатчиками [9]. Прогиб заготовки изучается с помощью простых оптических датчиков отсечки [10] и усовершенствованной фотонной доплеровской велосиметрии (PDV) [11]. В настоящей работе мы используем высокочастотный (ВЧ) индуктивный метод определения динамического прогиба. Этот подход является недорогим и позволяет эффективно подавлять сильные электромагнитные помехи [12]. Также следует отметить, что в отличие от PDV индуктивный метод обеспечивает непрерывное измерение положения, которое является более надежным в случае сложного движения (вперед и назад) с точками остановки.

В настоящей работе исследуется динамика деформации заготовки под действием импульса магнитного поля сложной формы, соответствующего режиму ВЕМФ. Также подробно обсуждается давление намагниченности на заготовку; ниже показано, что выражение, используемое в работе [4], является некорректным в случае EMF.

## 2. Экспериментальное оборудование

### 2.1. Электромагнитная система

Экспериментальная установка состоит из блока формирования импульсов, индукторного блока, измерительной и вспомогательной систем. Ее подробное описание и технические аспекты были представлены ранее [13]. Блок формирования импульсов генерирует импульс тока сложной формы в индукторе. Упрощенная схема разряда показана на рис.1. Первичная конденсаторная батарея  $C_1$  с общей емкостью 17 мФ и максимальным зарядным напряжением 3 кВ разряжается через тиристорный переключатель  $S_1$ , блокирующую индуктивность  $L_1$  около 100 мкГн и индуктор  $L_2$  около 20 мкГн. После максимума первичного тока включается диод  $D_1$  для блокировки обратного напряжения на конденсаторной батарее. Эта схема формирует медленно меняющийся прямой импульс тока. Поскольку напряжение на катушке индуктивности во время импульса меньше порога неконтролируемого запертого газонаполненного разрядника  $S_2$ , оно остается в выключенном состоянии.

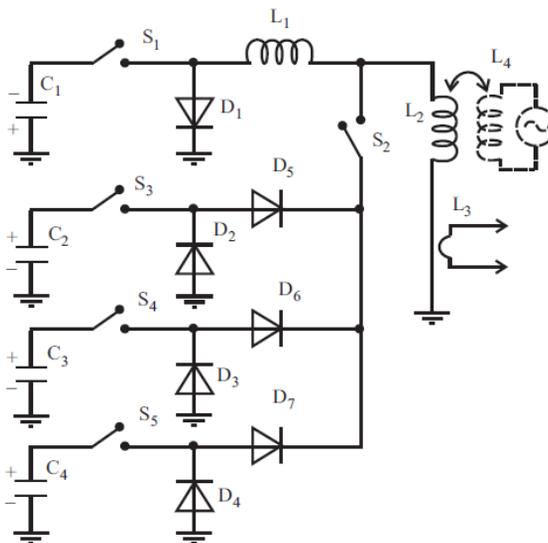
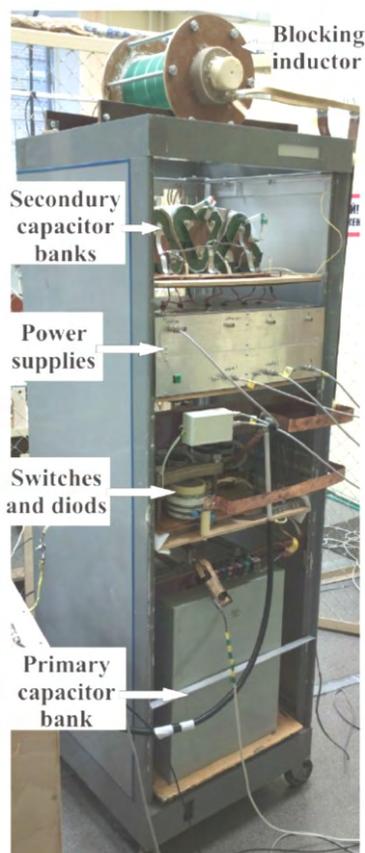


Рисунок 1. Схема разрядного контура

Три идентичных блока вторичных конденсаторов с общей емкостью 3 мкФ каждая и максимальным напряжением 12 кВ разряжаются последовательно вблизи максимума первичного тока. Амплитуда импульсов достаточна для включения искрового разрядника  $S_2$ . Три канала образуют последовательность коротких вторичных импульсов полярности противоположной прямому импульсу. Временная диаграмма срабатывания источников задается с шагом 100 нс. Кроубарные диоды  $D_2$ - $D_4$  включаются на задних фронтах вторичных импульсов. Диоды  $D_5$ - $D_7$  предотвращают помехи между каналами. Пояс Роговского  $L_3$  использовался для измерения тока индуктора. Блокирующая индуктивность  $L_1$  развязывает первичный и вторичный источники тока на

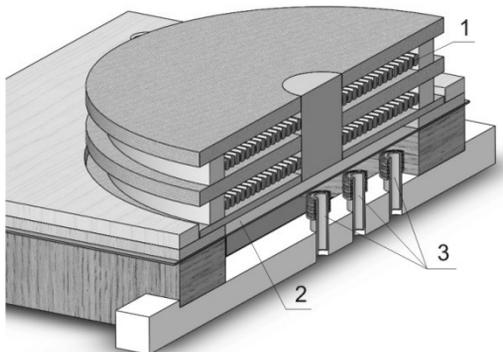
высоких частотах. Организация блока формирования импульсов показано на рис. 2. Ширина импульсов была выбрана для обеспечения эффективного ВЕМФ для заготовки из листовой стали толщиной 0,5-1 мм.



**Рисунок 2.** Внешний вид блока формирования импульсов

Установка оснащена индукторами двух типов [13]. В настоящей работе мы использовали плоский двойной спиральный индуктор (рис. 3) в основном из-за осесимметричной структуры магнитного поля и прогиба детали, что упростило их анализ. Индуктор был изготовлен из прямоугольной медной проволоки с армированием из параарамидного волокна. Заготовка была заземлена по окружности диаметром около 95мм. Отношение плотности магнитного потока на поверхности заготовки к току индуктора составляло около 0,3 Тл/кА.

Три индуктивных датчика прогиба были расположены под заготовкой (рис.3). Один из них был на оси, а два других были расположены на равном расстоянии друг от друга по радиусу.



**Рисунок 3.** Индукторный узел: 1 – провод индуктора, 2 – заготовка, 3 – индукционные датчики

## 2.2. Индуктивные датчики прогиба пластины

Схема индуктивного датчика прогиба пластины и их общий вид приведены на рис.4. Каждый из датчиков состоял из трех катушек и был намотан на диэлектрическую оправку диаметром 6мм. Центральная катушка была подключена к генератору гармонического сигнала с частотой около 2 МГц. Две другие идентичные катушки были расположены симметрично с двух сторон центральной катушки. Пара приемных катушек была намотана противоположно и соединена последовательно, как показано на рис.4а. Если датчик идеально сбалансирован, сигнал от приемных катушек имеет нулевую амплитуду. Заготовка нарушает симметрию и приводит к появлению гармонического сигнала на осциллографе. Чем меньше расстояние от конца датчика до заготовки, тем больше амплитуда сигнала. Эта зависимость является нелинейной. Поэтому каждый датчик был предварительно откалиброван. Пример зависимости амплитуды от расстояния показан на рис.5. Видно, что при измерении ошибка резко возрастает на больших расстояниях. Асимптотическое значение амплитуды сигнала возникло из дисбаланса датчика. Его можно устранить с помощью точной регулировки датчика или учесть при калибровке.

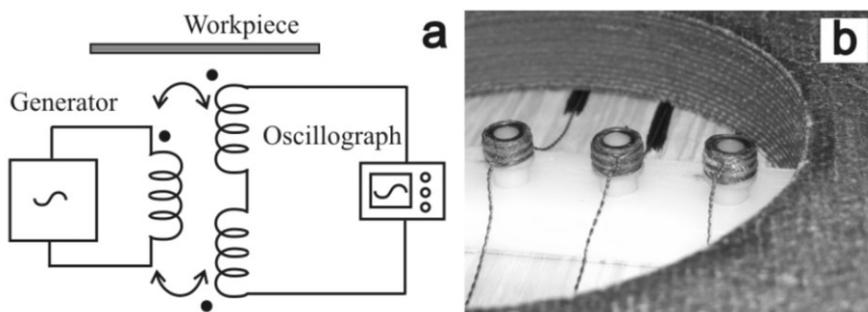


Рисунок 4. Индукционные датчики положения: (а) схема, (б) внешний вид

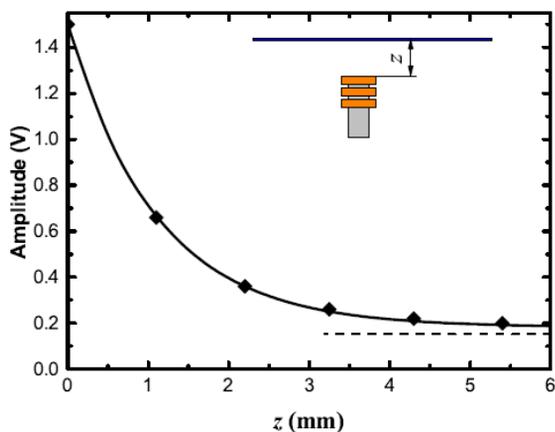


Рисунок 5. Калибровочная кривая

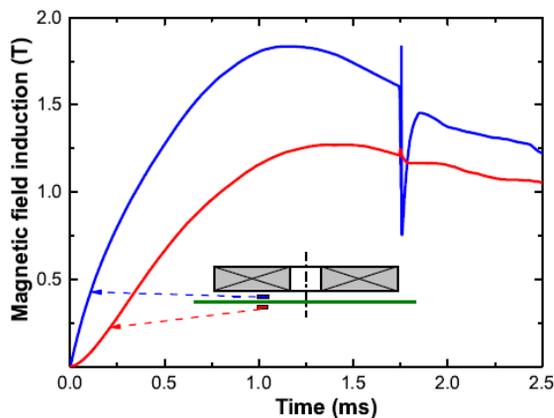


Рисунок 6. Диффузия магнитного поля через заготовку. Расположение датчиков положения показаны на вставке

Полосовые фильтры в генераторной и приемной линиях предполагалось применять в случае интенсивных электромагнитных помех. Однако мы не использовали их, так как шумы были умеренными. Чтобы устранить их полностью мы выполнили численную фильтрацию сигналов. Окончательное характерное время отклика составляло около 3мкс.

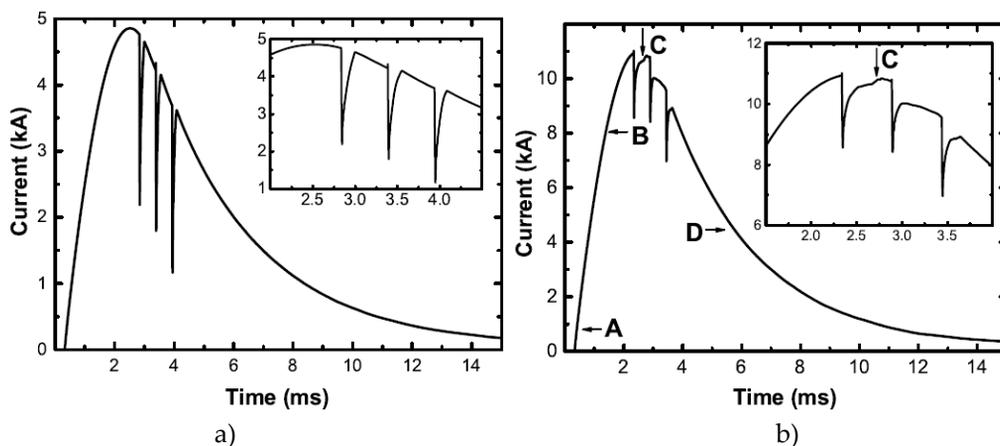
## 3. Экспериментальные результаты по магнитной и немагнитной деформации листового металла

Прежде всего, мы измерили магнитное поле выше и ниже заготовки с помощью пары измерительных катушек, чтобы проверить характер диффузии магнитного поля через заготовку.

Результаты для медной заготовки толщиной 0,3 мм показаны на рис. 6. Видно, что медленная часть магнитного поля проникает сквозь заготовку практически без потерь, а быстрая часть практически полностью экранируется, то есть основное условие для ВЕМФ выполнено.

Мы исследовали прогиб заготовок из меди толщиной 0,3мм и стали толщиной 0,6мм. Параметры оборудования было приспособлено для обеспечения преимущественно упругого режима со слабыми остаточными пластическими деформациями.

Импульсы тока в индукторе показаны на рис.7. В случае тонкой медной заготовки форма импульса была такой же, как и ожидалось, а именно четверть периода синусоиды и последующая экспонента распад. Гораздо более интенсивное магнитное поле было приложено к стальной заготовке и форма вторичных импульсов тока стала искаженной (рис.7б). Мы обсуждаем происхождение этого эффекта в следующем разделе.



**Рисунок 7.** Форма импульса тока: а) медная заготовка толщиной 0,3мм, б) стальная заготовка толщиной 0,6мм

Во время импульсов тока измерялось динамическое отклонение медных и стальных заготовок. Медная смещалась от индуктора на фронте первичного импульса на расстояние до 2,5мм. На вторичных импульсах она притягивалась к индуктору примерно до 5мм, где происходило ее касание с индуктором.

Поскольку прогиб измерялся индуктивными датчиками одновременно на трех радиусах, и мы предполагая осевую симметрию [14], можно было восстановить приблизительную зависимость от времени формы заготовки. Разложение по модам осесимметричного прогиба круговой пластины имеет следующую форму [15]

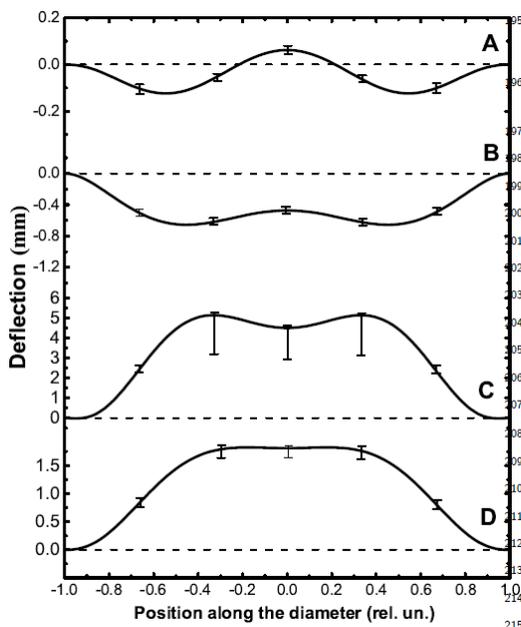
$$z(r, t) = \sum_{n=1} c_n(t) \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right]^{n+1}, \quad (1)$$

где  $r_0$  - внешний радиус заготовки,  $c_n(t)$  - произвольные функции времени. Первое слагаемое в этом выражении примерно соответствует прогибу пластины при равномерном распределении статического давления [15], а последующие вытекают из радиальной неоднородности давления.

Непрерывные индуктивные измерения вертикальных смещений на трех разных радиусах позволяют определять функции  $c_n(t)$  до  $n=3$  [7] и, следовательно, форма заготовки определяется в произвольное время в трехмодовом приближении.

Изменение формы стальной заготовки во время импульса магнитного поля во времени показано на рис. 8. Следует отметить, что в самом начале импульса (точка А) прогиб противоположно направленный, т.е. заготовка притягивается к индуктору на оси и отталкивается на некотором расстоянии от оси. Затем слабое отталкивание доминировало в середине фронта импульса (В). Во время вторичных импульсов (С) заготовка сильно притягивается к индуктору с

максимальной скоростью около 20 м/с. После этого заготовка медленно релаксирует (D) до остаточного прогиба.



**Рисунок 8.** Форма стальной пластины в процессе импульса магнитного поля. Кривые соответствуют точкам на графике рис.7.

## 4. Обсуждение

### 4.1. Искажение тока импульса

Существует несколько возможных причин наблюдаемого искажения интенсивных импульсов тока (рис.7b). Во-первых, первичный источник тока (конденсатор  $C_1$ , переключатель  $S_1$  и диод  $D_1$  на рис.1) может влиять на работу вторичных источников тока. Положительное напряжение, генерируемое в индукторе на заднем фронте первичного импульса, может блокировать диоды во вторичных источниках. Этот эффект был изучен с помощью схемотехнического моделирования и экспериментальных испытаний. Было показано, что напряжение очень низкое и недостаточное для отключения.

Дополнительное напряжение индуктора может быть индуцировано взаимодействием заготовка-индуктор, как показано на рис.1 штриховой линией. Магнитная диффузия приводит к слабому отрицательному напряжению индуктора и не может влиять на форму импульса вторичного тока. Во время вторичных импульсов скорость заготовки становилась максимальной, а магнитное число Рейнольдса достигало значения, близкого к единице. Заготовка, приближающаяся к индуктору, вытесняет из нее магнитный поток. Этот эффект вызвал дополнительное положительное напряжение индуктора, что привело к отключению диодов во вторичных источниках.

Чтобы подтвердить это предположение, мы провели дополнительные эксперименты со стальной заготовкой, поддерживаемой стеклопластиковыми пластинами толщиной 1мм, которые сдерживали движение заготовки. В этом случае искажение формы тока было существенно подавлено, что доказало влияние движения заготовки на искажение импульсов вторичного тока.

Обрыв вторичных токов виден на рис.7b в виде небольших ступеней в конце каждого вторичного импульса. Следует отметить, что это приводит к коротким импульсам напряжения на индуктивной нагрузке с амплитудой от 0,6 кВ до 1 кВ. Этот факт показывает, что эффект взаимодействия заготовки с индуктором следует учитывать при разработке устройств ВЕМФ.

#### 4.2. Распределение магнитного поля

Мы смоделировали распределение магнитного поля в системе индуктор-деталь в рамках двумерной осесимметричной задачи  $(r, z)$ . Она была сформулирована через полоидальную компоненту векторного потенциала [16]

$$\frac{\partial^2 A_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\phi}{\partial r} - \frac{A_\phi}{r^2} + \frac{\partial^2 A_\phi}{\partial z^2} = -\mu j_\phi \quad (2)$$

где  $j_\phi$  -  $\phi$ -компонента плотности внешнего тока,  $\mu$  - магнитная проницаемость. Чтобы учесть движение детали, к левой части следует добавить член  $-\sigma \mathbf{v} \times (\nabla A_\phi)$ , где  $\mathbf{v}$  - скорость. Следует отметить, что почти все время движение магнитное число Рейнольдса  $R_m = \sigma v \mu d$  было малым ( $R_m \ll 1$ ). Здесь  $\sigma$  и  $d$  - проводимость и толщина заготовки. В течение коротких периодов времени во вторичных импульсах скорость была максимальной и  $R_m$  стремилась к единице. Результаты моделирования были подтверждены экспериментальными данными по току индуктивности и распределению магнитного поля.

#### 4.3. Силы и динамика прогиба

Предполагается, что заготовка представляет собой тонкую плоскую пластину, лежащую в  $r$ -плоскости (перпендикулярно оси). Магнитная объемная сила имеет следующий общий вид [16]

$$\mathbf{f}_B = \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \frac{1}{2} H^2 \nabla \mu \quad (3)$$

где  $\mathbf{j}$  - плотность тока,  $\mathbf{B}$  - плотность магнитного потока,  $H$  - магнитная интенсивность. Первый член - это плотность силы Лоренца, а второй - часть, связанная с намагниченностью. Следует отметить, что невозможно полностью разделить два слагаемых в выражении (3) [17].

Рассмотрим плотность силы намагничивания для магнитомягкого материала, например, низколегированная сталь. При любом разумном предположении о магнитном поле в процессе EMF магнитно-мягкий материал должен находиться в насыщенном магнитном состоянии. Тогда относительная магнитная проницаемость может быть записана как

$$\mu_r = \frac{M_S}{H} + 1 \quad (4)$$

Значение намагниченности насыщения стали ( $\mu_0 M_S = 1,6$  Тл) мы получили после предварительного измерения на вибромагнетометре. Давление ( $z$ -компоненту) на поверхности заготовки можно оценить путем интегрирования компоненты плотности силы по толщине.

$$P_z = -\frac{1}{2} \int H^2 (\mathbf{n}_z \cdot \nabla) \mu dz = P_V + P_S \quad (5)$$

где  $\mathbf{n}_z$  - единичный вектор вдоль оси  $z$ . Первый член в этом выражении является результатом интегрирования в объеме, а второй - следствием скачка магнитной проницаемости на поверхности. Подстановка уравнения (4) в уравнение (5) дает

$$P_z(r) = \mu_0 M_0 (\tilde{H}_1(r) - \tilde{H}_2(r)) + \frac{\mu_0 M_0^2}{2} (\cos \tilde{\vartheta}_1^2 - \cos \tilde{\vartheta}_2^2) \quad (6)$$

Здесь переменные с тильдой - магнитная интенсивность на внутренней стороне поверхности и угол между ней и нормалью; индексы 1 и 2 обозначают верхнюю (обращенную к индуктору) и нижнюю

поверхности пластины соответственно. В терминах плотности магнитного потока на внешней стороне поверхности ( $B$ ) выражение принимает простой вид

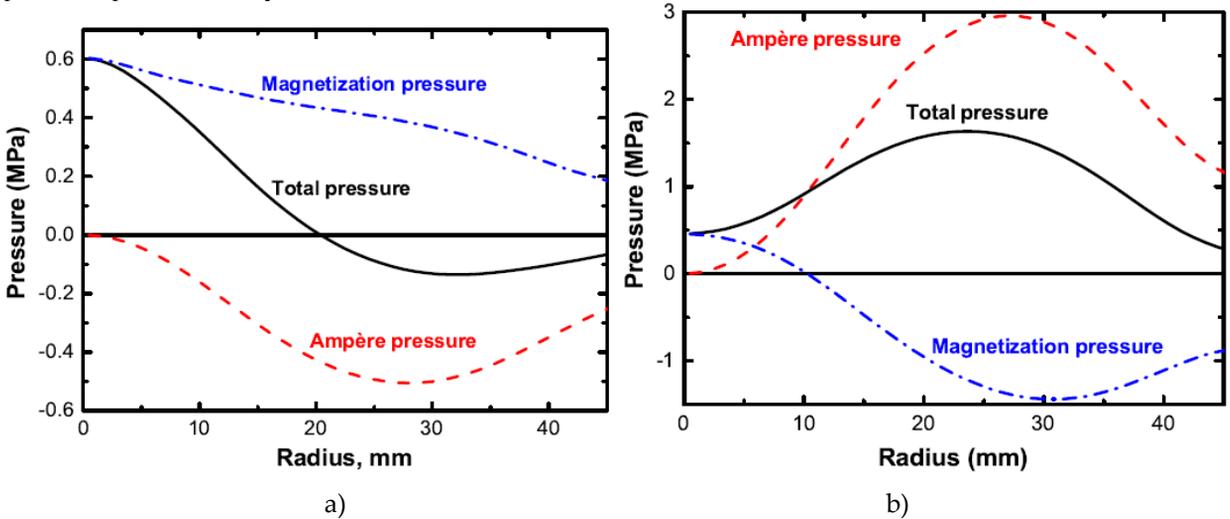
$$P_z(r) = M_0(B_1(r) - B_2(r)). \quad (7)$$

Этот результат отличается от того, который был получен в работе [4], где магнитная проницаемость предполагалась постоянной. Такое предположение справедливо только при очень низкой магнитной интенсивности ( $H \lesssim 10^3 \text{ A/m}$ ) и не выполняется при EMF.

Обсудим кратко магнитные силы, действующие на магнитотвердый проводящий материал. Мы предполагаем постоянную намагниченность по радиусу  $M_{0r}$ . Здесь удобно представить второе слагаемое в уравнении (3) как  $\mathbf{f} = \mathbf{j}_m \times \mathbf{B}_e$ , где  $\mathbf{j}_m = \nabla \times \mathbf{M}$  - это плотность тока намагниченности, а  $\mathbf{B}_e$  - это внешнее магнитное поле [16]. Отсюда получаем выражение для давления намагничивания  $P_z(r) = M_{0r}(B_{1r}(r) - B_{2r}(r))$ , которое аналогично уравнению (7).

Расчитанное распределение магнитного давления по ферромагнитной стальной детали показано на рис.9. В самом начале импульса притягивающее давление намагниченности преобладает в центральной части детали, и отталкивающее давление Лоренца становится преобладающим на некотором радиусе.

Этот результат хорошо согласуется с наблюдаемым прогибом детали (кривая А на рис.8). На правом графике рис.9 видно, что на фронте первого вторичного импульса возникает интенсивное притяжение. Давление Лоренца и давление намагничивания меняют знак почти по всей поверхности заготовки, за исключением небольшой области, близкой к оси, где давление намагниченности остается положительным. Это сглаживает распределение общего давления во время вторичных импульсов.



**Рисунок 9.** Расчет полного давления, действующей на стальную магнитную пластину: а) передний фронт первичного импульса, б) передний фронт первого вторичного импульса

### 5. Заключение

Показано, что основное условие процесса ВЕМФ, а именно проникновение медленного первичного магнитного поля через заготовку и экранирование импульсов вторичного магнитного поля может быть достигнуто на низкопроводящем магнитном листовом материале, таком как магнитомягкое железо.

Электромагнитное взаимодействие движущейся детали и индуктора вызывает резкое переключение диодов во вторичных источниках тока и скачок напряжения на индуктивности. Этот эффект следует учитывать при разработке устройств ВЕМФ, поскольку он может мешать нормальной работе.

Давление намагниченности пропорционально разности плотности магнитного потока на верхней и нижней поверхностях. Оно в основном направлено против давления Лоренца. Это свидетельствует о дальнейших перспективах развития технологии ВЕМФ. Увеличение амплитуды первичного импульса приведет к увеличению силы притяжения Лоренца. Усиление вторичных импульсов приводит к появлению как сил притяжения Лоренца, так и сил отталкивания. Поэтому общий результат не очевиден в этом случае.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (региональный проект № 18-48-520006).

### Список литературы

- 1 I. V. Belyy, S. M. Fertik, L. T. Khimenko, *Spravochnik po magnitno-impulsnoy obrabotke metallov* (1977, Russian edition) [Electromagnetic Metal Forming Handbook]. English Translation by Altynova M. M., 1996.
- 2 V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya, M. Kleiner, Electromagnetic forming - A review, *J. Mater. Process. Technol.* 211 (2011) 787829.
- 3 K. A. Hansen, I. G. Hendrickson, Electromagnetic dent puller, US patent 3998081 (1976).
- 4 Y. V. Batygin, S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov, Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals fundamentals and perspective applications, *J. Mater. Process. Technol.* 213 (3) (2013) 444
- 5 Y. V. Batygin, S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov, Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals, *J. Mater. Process. Technol.* 214
- 6 Y. B. Kudasov, Device and method for electromagnetic stretching and removing dents, RF patent 2558700, PCT application WO 2014/129932 237 A1 (2014).
- 7 Y. B. Kudasov, D. A. Maslov, O. M. Surdin, *Tech. Phys. Lett.* 43 (1) (2017)
- 8 R. Daou, F. Weickert, M. Nicklas, F. Steglich, A. Haase, M. Doerr, High resolution magnetostriction measurements in pulsed magnetic fields using fiber Bragg gratings, *Rev. Sci. Instrum.* 107 (2010) 124907.
- 9 J. Chen, X. Xi, S. Wang, J. Lu, C. Guo, W. Wang, E. Liu, W. Wang, L. Liu, G. Wu, A method of measuring dynamic strain under electromagnetic forming conditions, *Rev. Sci. Instrum.* 87 (2016) 044301.
- 10 E. Paese, M. Geier, R. P. Homrich, P. Rosa, R. Rossi, Sheet metal electromagnetic forming using a spiral coil: Experiments, modeling, and validation, *J. Mater. Process. Technol.* 263 (2019) 408422.
- 11 A. Vivek, K. H. Kim, G. S. Daehn, Simulation and instrumentation of electromagnetic compression of steel tubes, *J. Mater. Process. Technol.* 211 (2011) 840850.
- 12 Y. B. Kudasov, A. V. Philippov, Measurements of High-Frequency Complex Impedances in Fast Processes, *Instrum. Exp. Tech.* 50 (2007) 95.
- 13 Y. B. Kudasov, I. V. Makarov, V. V. Platonov, O. M. Surdin, D. A. Maslov, S. L. Voronov, A. Y. Malyshev, A. S. Korshunov, E. Y. Popov, A. S. Svetlov, *Instrum. Exp. Tech.* 62 (1) (2019) 88
- 14 L. Hong-wei, Y. Si-liang, Zh. Mei, Zh. Xin, , *J. Mater. Process. Technol.* 263 (2019) 423–439
- 15 W. Weaver Jr., S. P. Timoshenko, D. H. Young, *Vibration problem in engineering*, Wiley, USA, 1990.
- 16 H. E. Knoepfel, *Magnetic Fields: a Comprehensive Theoretical Treatise for Practical Use*, Wiley, USA, 2000.
- 17 L. Landau, E. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media, Course of Theoretical Physics, V.8, 2nd Edition*, Pergamon Press, Oxford, 1984, 620p.