

05.2

## Эффективность обратной частотной магнитно-импульсной обработки

© Ю.Б. Кудасов<sup>1,2,3</sup>, Д.А. Маслов<sup>1,2,3</sup>, О.М. Сурдин<sup>1,2,3</sup>

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

<sup>3</sup> Российский федеральный ядерный центр — ВНИИЭФ, Саров

E-mail: mossom1@rambler.ru

Поступило в Редакцию 17 июля 2016 г.

Обсуждается зависимость эффективности магнитно-импульсной обработки от формы импульсного магнитного поля. Показано, что замена одиночного импульса в быстрой части магнитного поля на последовательность импульсов в случае обратной обработки увеличивает удельный механический импульс, вложенный в заготовку, и, следовательно, повышает эффективность обработки. Обсуждаются возможные применения методики к устранению вмятин на кузове автомобиля и элементах летательных аппаратов.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.02.44181.16445

Импульсные системы сильных магнитных полей получили широкое распространение в технологических установках и научных исследованиях [1–4]. Магнитно-импульсная сварка позволяет создавать сварные соединения разнородных металлов (сталь–алюминий, медь–алюминий и т.д.), а также соединений металлов с неметаллами (алюминий–стекло). Импульсная магнитная штамповка (высокоскоростная формовка металлических деталей за счет пондеромоторных сил магнитного поля) является наиболее технологичной и производительной среди динамических методов [2,3].

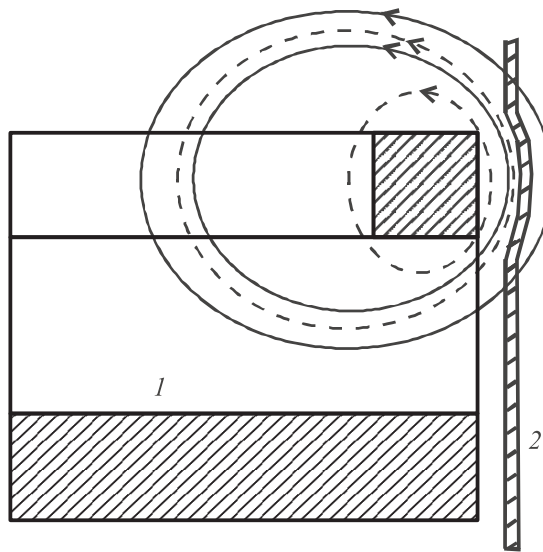
Магнитно-импульсная обработка основана на пондеромоторном взаимодействии импульсного магнитного поля с металлическими заготовками. Импульсное магнитное поле создает в заготовке индукционные токи, взаимодействие с которыми приводит к возникновению магнитного давления. Для эффективного преобразования энергии импульсного магнитного поля в механическую энергию необходимо, чтобы глубина проникновения магнитного поля была соизмерима или меньше, чем

толщина заготовки [3,5]. Чаще всего используют тонкостенные цилиндрические или плоские листовые металлические заготовки. Магнитными свойствами металлической заготовки, как правило, можно пренебречь, поскольку характерные величины напряженности магнитного поля, создаваемого индуктором, на один-два порядка превышают поле насыщения ферромагнитного металла.

В наиболее характерных случаях импульсное магнитное поле создает давление, отталкивающее заготовку от индуктора, что связано с правилом Ленца: направление индукционных токов таково, чтобы препятствовать изменению импульсного магнитного поля [5]. В то же время возможен и другой тип магнитно-импульсной обработки с притяжением заготовки к индуктору. Он может быть реализован за счет сложной формы импульса магнитного поля, например, если зависимость магнитного поля от времени представлена в виде суммы противоположно направленных медленной и быстрой частей [6]. При этом амплитуда медленной части должна быть значительно больше амплитуды быстрой части. Тогда взаимодействие индукционных токов, создаваемых быстрым импульсом, с медленной составляющей магнитного поля как раз и приводит к притяжению заготовки к индуктору. Такой тип обработки будем называть обратной, медленную часть импульса магнитного поля — первичным импульсом, а быструю — вторичным. Обратная магнитно-импульсная обработка является технологически довольно сложной. В частности, приходится решать проблемы взаимодействия двух мощных источников тока, работающих на одну нагрузку. Тем не менее этот метод был доведен до коммерческого использования и применяется для выправки вмятин на элементах летательных аппаратов [6].

Для распространения обратной магнитно-импульсной технологии на тонкостенные металлические детали с плохой проводимостью, например стальной кузов автомобиля, приходится сокращать длительность вторичного импульса магнитного поля. При этом неизбежно увеличивается пиковое напряжение на индукторе. Для его снижения можно раздробить вторичный импульс (частотная обработка), т. е. использовать вместо одиночного вторичного импульса последовательность импульсов меньшей амплитуды [7].

В настоящей работе мы исследуем вопрос о влиянии дробления вторичного импульса магнитного поля на эффективность магнитно-импульсной обработки при достаточно общих предположениях о конструкции устройства. Рассмотрим индуктор, создающий импульс



**Рис. 1.** Схематичное изображение ленточного индуктора с вырезом-концентратором  $1$  и заготовки  $2$ . Силовые линии первичного и вторичного магнитного поля показаны сплошными и пунктирными линиями соответственно.

магнитного поля на поверхности плоской металлической пластины (рис. 1). Форма импульса может быть представлена в виде суммы индукции первичного  $\mathbf{B}_1(\mathbf{r}, t)$  и вторичного  $\mathbf{B}_2(\mathbf{r}, t)$  магнитных полей  $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_1(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_2(\mathbf{r}, t)$ , причем амплитуда первичного импульса значительно превышает амплитуду вторичного  $|\mathbf{B}_1(\mathbf{r}, t)| \gg |\mathbf{B}_2(\mathbf{r}, t)|$ . Длительность первичного импульса выбрана таким образом, чтобы магнитное поле практически свободно проникало через заготовку и не создавало заметных индукционных токов и магнитного давления, т. е. в дальнейшем его можно считать постоянным по времени. Вторичный импульс, наоборот, должен быть достаточно коротким, чтобы магнитное поле не успевало проникнуть через заготовку, т. е. мы считаем  $\mathbf{B}_2(\mathbf{r}, t) = 0$  в области справа от заготовки на рис. 1.

Рассмотрим воздействие одиночного вторичного импульса магнитного поля. Всюду ниже мы предполагаем квазистационарный режим, т. е. пренебрегаем токами смещения [5]. Объемная сила, действующая

на заготовку, может быть записана как [1]

$$f(\mathbf{r}, t) = \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\mu_0} \text{rot}[\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)] \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t),$$

где  $\mathbf{j}$  — плотность тока,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума. Здесь и далее радиус-вектор  $\mathbf{r}$  соответствует точке в объеме заготовки. Для медленной части импульса можно записать  $\text{rot}[\mathbf{B}_1(\mathbf{r}, t)] = 0$ .

Далее мы будем исследовать случай плоской тонкой заготовки, т.е. ее толщина будет считаться малой по отношению ко всем остальным характерным геометрическим параметрам системы (размеры индуктора и заготовки, расстояние от индуктора до заготовки и т.д.). Тогда, принимая во внимание то, что для вторичного импульса глубина проникновения магнитного поля меньше толщины заготовки, градиенты всех компонент индукции магнитного поля по толщине заготовки много больше, чем вдоль плоскости  $|\nabla_z \mathbf{B}_2| \gg |\nabla_{x(y)} \mathbf{B}_2|$ . Таким образом, в заготовке текут преимущественно планарные токи, так как  $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = \mu_0^{-1} \text{rot}[\mathbf{B}_2(\mathbf{r}, t)]$ .

Магнитное поле вторичного импульса также удобно разложить на две составляющие  $\mathbf{B}_2(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_{20}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_{21}(\mathbf{r}, t)$ , где первое слагаемое — вторичное магнитное поле, создаваемое индуктором в отсутствие заготовки, а второе — собственное магнитное поле заготовки, создаваемое индукционными токами. Заметим, что  $\text{rot}[\mathbf{B}_{20}(\mathbf{r}, t)] = 0$ . Теперь объемную силу можно представить в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{f}_1(\mathbf{r}, t) + \mathbf{f}_{20}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{f}_{21}(\mathbf{r}, t) \\ &= \frac{1}{\mu_0} \text{rot}[\mathbf{B}_{21}(\mathbf{r}, t)] \mathbf{B}_1[(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_{20}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_{21}(\mathbf{r}, t)]. \end{aligned}$$

Третье слагаемое описывает взаимодействие токов в заготовке с собственным магнитным полем. Нетрудно показать для планарных токов, что взаимодействие двух элементов тока в пластине создает компоненту объемной силы, перпендикулярную плоскости на характерных расстояниях порядка толщины пластины  $d$  и меньше. Тогда перпендикулярная компонента объемной силы  $\mathbf{f}_{21}(\mathbf{r}, t)$  будет иметь порядок величины  $\ln(d/D) f_{21}(\mathbf{r}, t)$ , где  $D$  — характерный размер области взаимодействия пластины с магнитным полем. Таким образом,  $\mathbf{f}_{21}(\mathbf{r}, t)$  лежит преимущественно в плоскости заготовки и практически не создает давления на поверхность пластины, поэтому далее ею будем пренебрегать.

Заметим, что  $\mathbf{B}_1(\mathbf{r}_b, t)$  и  $\mathbf{B}_{20}(\mathbf{r}_b, t)$  коллинеарны, поскольку они создаются одним и тем же индуктором. Теперь силу магнитного давления по поверхности пластины можно приближенно представить в виде

$$P(\mathbf{r}_b, t) = \frac{1}{\mu_0} \left( \pm B_1(\mathbf{r}_b, t) B_{20}(\mathbf{r}_b, t) + \frac{B_{20}^2(\mathbf{r}_b, t)}{2} \right), \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}_b$  — радиус-вектор, соответствующий точке на поверхности заготовки. Знак первого слагаемого зависит от взаимного направления первичного и вторичного магнитных полей (и полярности первичного и вторичного тока в индукторе). Если направления первичного и вторичного магнитных полей совпадают, то реализуется отталкивание заготовки от индуктора. При встречном направлении магнитных полей возникает притяжение заготовки к индуктору, поскольку первое слагаемое оказывается больше, чем второе.

Полный удельный механический импульс (на единицу поверхности), вложенный в заготовку магнитным полем, можно рассчитать как

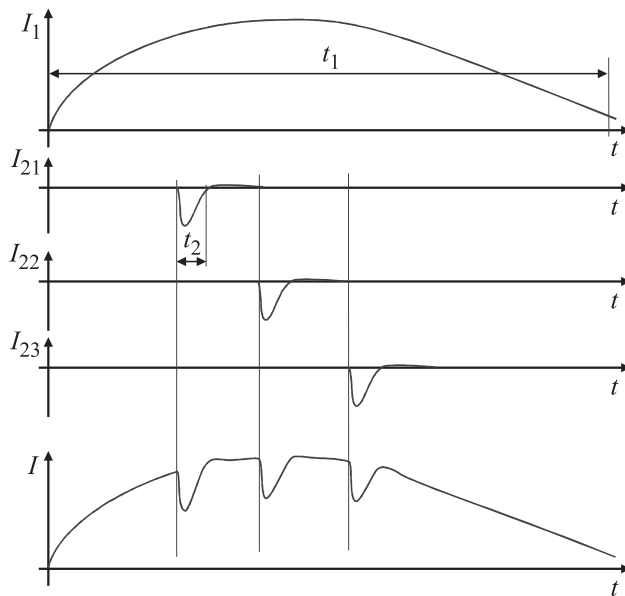
$$K(\mathbf{r}_b) = \int P(\mathbf{r}_b, t) dt = \pm K_{12}(\mathbf{r}_b) + K_2(\mathbf{r}_b).$$

Здесь два слагаемых соответствуют слагаемым в (1).

Теперь вместо одиночного импульса вторичного магнитного поля рассмотрим последовательность импульсов (рис. 2). Причем для простоты будем считать, что  $N$  одинаковых импульсов вторичного магнитного поля имеют ту же форму, что и одиночный, рассмотренный выше, но имеют амплитуду в  $N$  раз меньшую. Предполагая линейную диффузию магнитного поля в заготовку, будем считать пространственное распределение индукции магнитного поля неизменным при дроблении (с точностью до коэффициента). Нетрудно показать, что полный удельный механический импульс, полученный заготовкой от последовательности импульсов, будет равен

$$K(\mathbf{r}_b) = \pm K_{12}(\mathbf{r}_b) + \frac{K_2(\mathbf{r}_b)}{N}. \quad (2)$$

Видно, что для прямой магнитно-импульсной обработки (знак „+“ в первом слагаемом) такое дробление вторичного импульса приводит к снижению полного механического импульса заготовки, а для обратной („–“) к увеличению. Можно рассмотреть более естественный способ дробления вторичного импульса магнитного поля. Предположим, что



**Рис. 2.** Форма импульсов тока в индукторе при обратной частотной магнитно-импульсной обработке:  $I_1$  — первичный импульс;  $I_{21}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{23}$  — последовательность вторичных импульсов;  $I$  — полный ток в индукторе.

дробим вторичный импульс таким образом, чтобы полная энергия источника оставалась постоянной. Для быстрых импульсов необходимая энергия источника определяется в основном индуктивностью индуктора, т.е. ее можно оценить как  $LI_m^2/2$ , где  $I_m$  — максимальное значение вторичного тока в индукторе, а  $L$  — его индуктивность. Поскольку магнитное поле, создаваемое индуктором, пропорционально току, при сохранении общей энергии с увеличением числа импульсов вторичного магнитного поля их амплитуда должна уменьшаться как  $B_{2N} \propto N^{-1/2}$ . Тогда выражение (2) заменяется на

$$K(\mathbf{r}_b) = \pm\sqrt{N}K_{12}(\mathbf{r}_b) + \frac{K_2(\mathbf{r}_b)}{\sqrt{N}}.$$

Здесь механический импульс увеличивается в обоих случаях, но для обратной обработки увеличение происходит быстрее.

Следует отметить, что выше мы рассматривали только механическое действие импульсного магнитного поля на заготовку. Есть ряд особенностей, которые могут оказать существенное влияние на процесс деформации. Например, при повторении импульсов магнитного давления с достаточно высокой частотой в металлической заготовке может развиваться гиперпластичность, дополнительно способствующая деформации заготовки. Важной проблемой является динамика движения заготовки и соотношение частот собственных колебаний заготовки и повторения вторичных импульсов.

Конструкция устройства для реализации частотной обратной магнитно-импульсной обработки подробно обсуждалась в работе [7]. В качестве индуктора использовался ленточный индуктор с вырезом-концентратором [8]. Конфигурация магнитного поля такого индуктора такова, что магнитное давление создается по всей области взаимодействия в отличие от плоского спирального индуктора, на оси которого магнитное давление стремится к нулю. Вторичный источник тока был изготовлен из трех одинаковых независимых импульсных источников. Было показано, что при умеренных токах (20 кА от первичного источника и 3 кА от вторичного) и напряжениях на индукторе, не превышающих 10 кВ, в заготовке развиваются механические напряжения до 1 ГПа в каждом вторичном импульсе, что превышает предел текучести стали и приводит к необратимой деформации, в случае обратной штамповки — к вытяжке заготовки в направлении индуктора.

Таким образом, замена обратного импульса магнитного поля последовательностью импульсов меньшей амплитуды повышает КПД процесса вытяжки.

Работа поддержана проектом РФФИ № 15-48-02448.

## Список литературы

- [1] Лагутин А.С., Ожогин В.И. Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [2] Жолнин А.Г., Якушкин А.А., Рыковский А.И. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. С. 62–76.
- [3] Psyk V., Risch D., Kinsey B.L. et al. // J. Mater. Proc. Technol. 2011. V. 211. P. 787–829.

- 
- [4] *Shneerson G.A., Dolotenko M.I., Krivosheev S.I.* Strong and superstrong pulsed magnetic field generation. Berlin: Walter de Gruyter, 2014.
- [5] *Белый И.В., Фертик С.М., Хищенко Л.Т.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977.
- [6] *Hansen K.A., Hendrickson I.G.* Electromagnetic dent puller. US patent N 3998081, 1976.
- [7] *Кудасов Ю.Б.* Устройство и способ электромагнитной вытяжки и устранения вмятин: Пат. РФ № 2558700, 2013. [Kudasov Yu.B. Device and method for electromagnetic stretching and removing dents. PCT Patent application WO 2014/129932 A1 (2014)].
- [8] *Hansen K.A., Hendrickson I.G.* Electromagnetic dent remover with electromagnetic localized work coil. US patent N 4061007 (1977).