

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА МАГНИТНОГО ПОЛЯ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

DYNAMICS OF METAL PLATE MOTION UNDER MAGNETIC FIELD PULSE OF COMPLEX SHAPE

Ю. Б. Кудасов^{1,2}, Р. В. Козабаранов¹, И. В. Макаров², В. В. Платонов^{1,2}, О. М. Сурдин^{1,2},
Д. А. Маслов^{1,2}, А. С. Коршунов², Е. Я. Попов¹, А. С. Светлов¹
Yu. B. Kudasov^{1,2}, R. V. Kozabaranov¹, I. V. Makarov², V. V. Platonov^{1,2}, O. M. Surdin^{1,2},
D. A. Maslov^{1,2}, A. S. Korshunov², E. Ya. Popov¹, A. S. Svetlov¹

¹Саровский физико-технический институт, НИЯУ «МИФИ», г. Саров

¹Sarov Physics and Technology Institute, NRNU “MEPhI”, Sarov

²ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

²Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Представлена экспериментальная установка для исследования процесса деформации плоских тонколистовых металлических заготовок под действием импульсного магнитного поля сложной формы [1,2]. Импульс имеет медленно изменяющуюся часть длительностью около 3-10 мс и последовательность коротких импульсов обратной полярности с фронтом 15 мкс и длительностью около 100 мкс. Такой комбинированный импульс позволяет вытягивать металлическую заготовку в направлении индуктора. Установка оснащена индукционной методикой измерения динамической деформации пластины. Обсуждается методика визуализации динамики движения пластины. Представлены результаты исследования динамики деформации медных и стальных пластин.

The experimental facility for the study of the deformation process of flat sheet metal blanks under the influence of a pulsed magnetic field of a complex shape is described in the report [1,2]. The pulse has a slow changing part of 3-10 ms length and short pulses sequence of reversed polarity with a front of 15 μ s and a length of $\sim 100 \mu$ s. Such a combined pulse allows stretching a metal blank in the inductor direction. The facility is equipped by an inductive method of dynamic deformation measurement of the plate. The method of visualization of the movement dynamics of the plate is discussed. The investigation results of the deformation dynamics of copper and steel plates are provided.

Магнитно-импульсная обработка металлов широко используется для выполнения различных технологических операций. Она особенно эффективна в случае операций с тонкостенными металлическими заготовками: формовка листовых и цилиндрических деталей, сварка разнородных металлов (алюминий-сталь, алюминий-медь) и т. д. [3, 4]. Импульсное магнитное поле создает давление на заготовку в направлении, соответствующему взаимному отталкиванию индуктора и заготовки [5]. Это связано с тем, что согласно правилу Ленца индукционные токи создают магнитное поле препятствующее изменению магнитного поля. С другой стороны, существует способ магнитно-импульсной формовки, при котором заготовка притягивается к индуктору [6]. Для его реализации необходимо создание импульса магнитного поля

сложной формы: медленно изменяющийся импульс большой амплитуды в прямом направлении, а в его максимуме короткий одиночный импульс [4] и последовательность импульсов [5, 6] обратной полярности (обратная магнитно-импульсная обработка).

Принципиальная схема силовой части устройства представлена на рис. 1. Конденсаторная батарея прямого тока с максимальным зарядным напряжением 3 кВ и полной емкостью 16,8 мФ разряжается через ключ на тиристоре Т1 и дроссель L1 на индуктор L2. При этом импульс тока имеет время нарастания около 3 мс и спада более 10 мс. Эти характеристики подобраны таким образом, чтобы магнитное поле проникало через заготовку, не вызывая в ней заметных пластических деформаций. Три одинаковых источника обратного тока

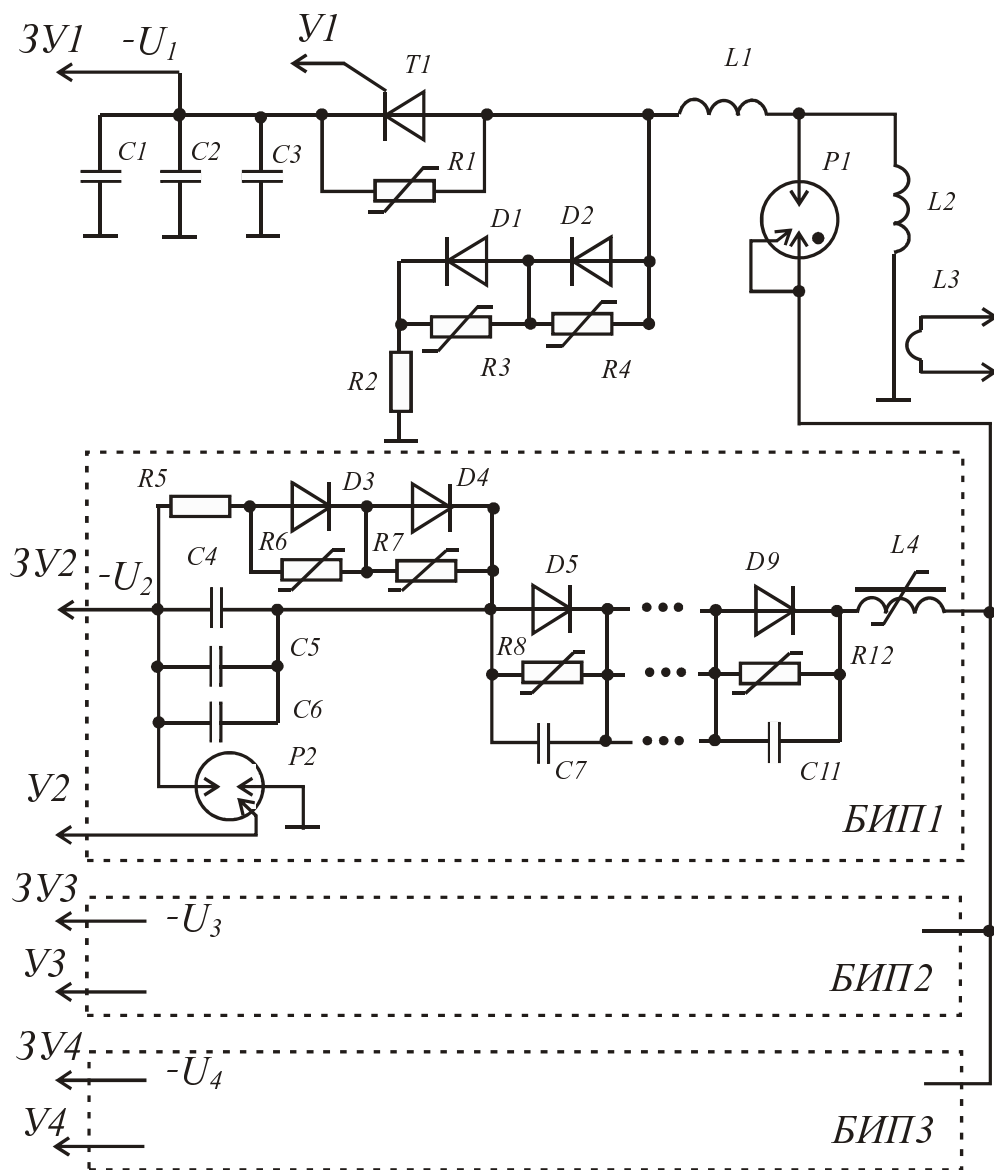


Рис. 1. Схема силовой части установки

(БИП1, БИП2, БИП3) включаются последовательно вблизи максимума тока прямого тока. Суммарная емкость конденсаторов (С4-С6) в каждом канале составляет 3 мкФ, максимальное зарядное напряжение – 12 кВ. Коммутация батареи производится разрядником Р2 через диодный столб D5-D9 с малым временем восстановления, дроссель L4 и неуправляемый разрядник Р1 на индуктор L2. Длительность нарастания импульса обратного тока составляет около 15 мкс, длительность спада от 30 до 120 мкс. Обратные импульсы тока являются достаточно быстрыми, чтобы глубина проникновения магнитного поля, создаваемого ими, была много меньше толщины заготовки. Это условие обеспечивает эффективное притяжение заготовки к индуктору [5, 6, 8]. Ток в индукторе контролируется поясом Роговского L3.

Отметим, что резисторы в кроубарных цепях источников прямого (R2) и обратного тока (R5) могут подбираться для подстройки времени спада импульса тока. Система зарядки источников обратного тока организована таким образом, чтобы при зарядке конденсаторных батарей прямого и обратного токов напряжением одной полярности в нагрузке создавались разнополярные импульсы тока. Для развязки источников прямого и обратного тока служит дроссель L1 индуктивностью около 35 мкГн, что немного больше индуктивности индуктора (около 20 мкГн).

В качестве нагрузки использовались два типа индукторов: двойная плоская спираль и ленточный индуктор с вырезом-концентратором тока и магнитного поля. Плоский спиральный индуктор наматывался на стеклотекстолитовом каркасе

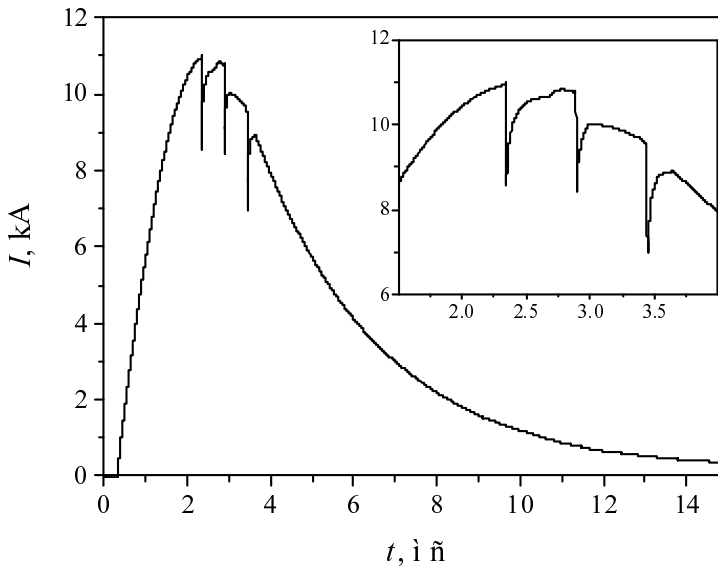


Рис. 2. Форма импульса тока в ленточном индукторе при напряжении на первичном источнике $U_1 = 1,5$ кВ и на вторичных – $U_2 = 7,5$ кВ

медным проводом сечением 2×3 мм² с бандажированием высокомодульной параарамидной нитью Армос. Такой индуктор прост в изготовлении и надежен. К его недостаткам следует отнести тот факт, что в следствие осесимметричной конфигурации магнитного поля поперечная сила в заготовке на оси системы равна нулю. Это отражается на динамике движения листовой заготовки [4]. Ленточный индуктор с вырезом-концентратором [7] создает примерно равномерное давление в пятне контакта. Однако его изготовление является технологически сложным, что снижает надежность. Характерная форма импульса тока в плоском индукторе показана на рис. 2.

Для исследования динамики движения металлической пластины под действием импульса магнитного поля индуктора была разработана индукционная многоточечная методика. Плоский спиральный индуктор создавал осесимметричное импульсное поле в области заготовки в виде круговой пластины радиусом $a = 45$ мм сосной с индуктором и с заземленным краем. Три индукционных датчика располагались под пластиной в центре и на радиусах $1/3 a$ и $2/3 a$. Электрическая схема датчиков и их размещение показано на рис. . Каждый датчик состоял из центральной катушки, подключенной к генератору синусоидального сигнала ($f = 3,1$ МГц) и двух приемных одинаковых катушек со встречной намоткой, размещенных соосно на торцах центральной катушки. Датчик

выполнялся на каркасе диаметром 6 мм. При отсутствии пластины и хорошей компенсации датчика сигнал с пары приемных катушек отсутствовал. При подлете пластины к одному из торцов датчика происходило увеличение сигнала. Зависимость амплитуды сигнала с датчика от расстояния между пластиной и торцом датчика предварительно калибровалась.

Форма пластины в момент времени t для круговой пластины с зажатым краем при осесимметричном изгибе может быть представлена в виде разложения [8]:

$$z(r, t) = c_1(t) \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^2 + c_2(t) \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^3 + c_3(t) \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^4 + \dots, \quad (1)$$

где $z(r, t)$ – величина прогиба пластины в зависимости от радиуса r . Три индукционных датчика позволяли измерять зависимости прогиба на трех радиусах: $z(0, t)$, $z(1/3, t)$ и $z(2/3, t)$. Используя разложение (1) до 3-го порядка, можно определить коэффициенты $c_n(t)$ ($n = 1, 2, 3$) определяются в каждый момент времени.

Были проведены исследования движения медных (толщиной 0,3 мм) и стальных (толщиной 0,5 мм) пластин. Было показано, что характер движения образцов достаточно сложный и сильно

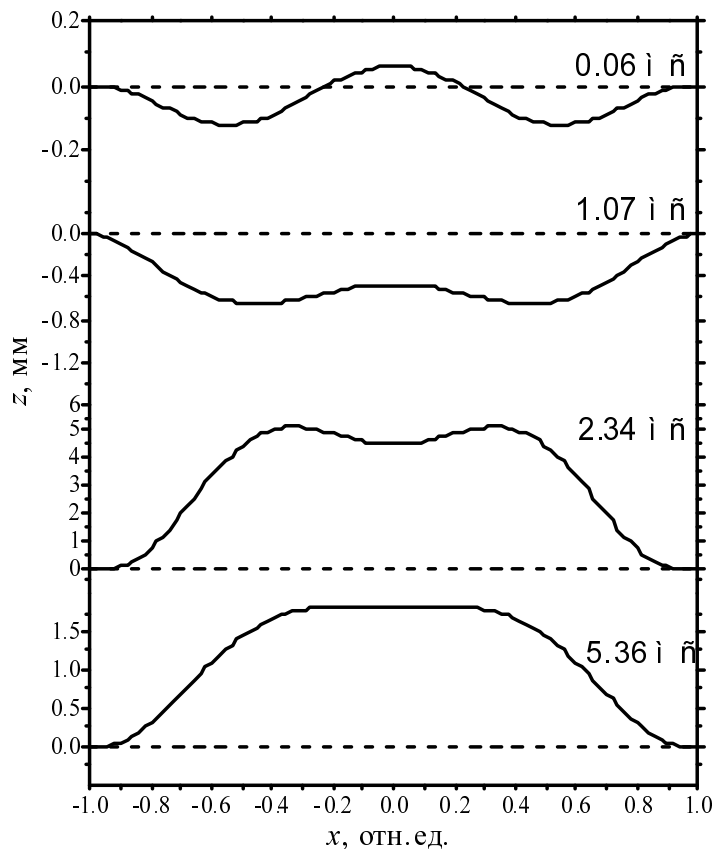


Рис. 3. Изменение формы круговой пластины (сталь толщиной 0,5 мм) под действием импульса магнитного поля плоского индуктора. Индуктор находится сверху пластины. Показан прогиб пластины в различные моменты времени (масштаб по вертикали различен) вдоль диаметра

зависит от материала. В случае стальной пластины существенную роль, особенно на начальных этапах движения, играла ее намагниченность. На рис. 3 показаны профили стальной пластины в различные моменты времени от начала импульса магнитного поля. Интересно заметить, что в начальные моменты времени (см. 0,06 мс на рис. 3) движение оказывается разнонаправленным: центральная область – к индуктору (вверх), а периферийная – от индуктора (вниз). Это связано с двумя составляющими пондеромоторной силы. За счет намагниченности пластина втягивается в область сильного магнитного поля. Поскольку пластина может считаться однородно намагниченной до насыщения, плотность силы для этой составляющей примерно одинакова по радиусу. Вихревые токи создают силу отталкивания пластины от индуктора. Однако распределение вихревых токов сильно неоднородно. В центре вихревые токи отсутствуют, а при увеличении радиуса плотность тока возрастает примерно пропорционально r . Поэтому плотность силы также оказывается сильно неоднородной. Следует отметить, что возникновение формы типа «сомбреро» (0,06 мс, рис. 3) из-за неоднородной

пондеромоторной силы со стороны импульсного магнитного поля наблюдалось ранее [4].

При дальнейшем возрастании магнитного поля силы отталкивания начинают преобладать (1,07 мс, рис. 3), при приближении к максимуму поля отталкивание сменяется притяжением, затем обратный короткий импульс приводит к сильному притяжению пластины к индуктору (2,34 мс, рис. 3).

В заключение, в работе разработана методика обратной магнитно-импульсной обработки с тремя обратными импульсами магнитного поля. Индукционная методика измерения прогиба пластины позволяет исследовать изменение формы образца в процессе магнитно импульсной обработки материала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект (18-48-520006 p_a).

Список литературы

1. Кудасов Ю. Б. Устройство и способ для электромагнитной вытяжки и устранения вмятин // Патент на изобретение РФ 2558700 (2013)

2. Kudasov Yu. B., Device and method for electromagnetic stretching and removing dents // PCT patent application PCT/RU2013/001051 (2013)
3. Белый И. В., Фертик С. М., Хищенко Л. Т., Справочник по магнитно-импульсной обработке, Харьков, Вища Школа, 1977.
4. Psyka V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M., Electromagnetic forming – review // Jour. Mater. Proc. Tech. v.211., p.787. (2011)
5. Лагутин А. С., Ожогин В. И. Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Hansen K. A., Hendrickson I. G., Electromagnetic dent puller // US patent №3998081, 1976.
7. K. A. Hansen, I. G. Hendrickson, Electromagnetic dent remover with electromagnetic localized work coil // US patent № 4061007 (1977).
8. Тимошенко С. П., Колебания в инженерном деле, М.: Машиностроение, 1985