

УДК 621.7.044.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2019 г. Ю. Б. Кудасов^{a,b,c,*}, И. В. Макаров^c, В. В. Платонов^{a,b,c},
О. М. Сурдин^{a,b,c,**}, Д. А. Маслов^{a,b,c}, С. Л. Воронов^c, А. Ю. Мальшев^c,
А. С. Коршунов^c, Е. Я. Попов^{a,b}, А. С. Светлов^{a,b}

^a Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ «МИФИ»
Россия, 607186, Саров Нижегородской обл., ул. Духова, 6

^b Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

^c РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики,
Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

*e-mail: yu_kudasov@mail.ru

**e-mail: mossom1@rambler.ru

Поступила в редакцию 02.02.2018 г.

После доработки 18.05.2018 г.

Принята к публикации 30.07.2018 г.

Представлена экспериментальная установка для исследования динамики деформации металлического образца под действием импульса магнитного поля сложной формы: медленная часть импульса прямой полярности (амплитудой до 15 Тл) и быстрая часть, состоящая из последовательности импульсов обратной полярности (амплитудой до 4 Тл). При этом создается давление, вызывающее притяжение образца к индуктору. Устройство состоит из четырех источников импульсного тока, работающих одновременно на один индуктор. Рассматривается генерация импульсного магнитного поля индукторами двух типов: плоским (двойная плоская спираль) и цилиндрическим с вырезом-концентратором магнитного поля. Установка снабжена многоточечной системой измерения динамики деформации пластины в процессе воздействия. Показана возможность пластической деформации медных, алюминиевых и стальных пластин толщиной до 1 мм.

DOI: 10.1134/S0032816219010166

В настоящее время деформация металлических элементов импульсными магнитными полями широко используется в научных исследованиях [1] и магнитно-импульсной обработке металлов [2]. В частности, возможно выполнение различных технологических операций с металлическими заготовками [3]: формовка плоских и цилиндрических деталей, сварка разнородных металлов (алюминий–сталь, алюминий–медь) и т.д. Как правило, импульсное магнитное поле создает давление на заготовку в направлении, соответствующем взаимному отталкиванию индуктора и заготовки [4]. Это связано с тем, что согласно правилу Ленца индукционные токи создают магнитное поле, препятствующее изменению магнитного поля. С другой стороны, существует экзотический способ магнитно-импульсной формовки, при котором заготовка притягивается к индуктору [5]. 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] или последовательность импульсов [6, 7] обратной полярности (обратная магнитно-импульсная обработка).

Обратная магнитно-импульсная обработка используется крайне редко, что связано, в первую очередь, со сложностью создания комбинированного импульса сильного магнитного поля. В частности, было разработано устройство с одиночным обратным импульсом для разработки технологии выправки вмятин на элементах летательных аппаратов [8, 9]. Недавно в работе [10] было теоретически показано, что последовательность обратных импульсов [6, 7] является более эффективной, чем одиночный обратный импульс [4], однако в этом случае конструкция устройства становится крайне сложной.

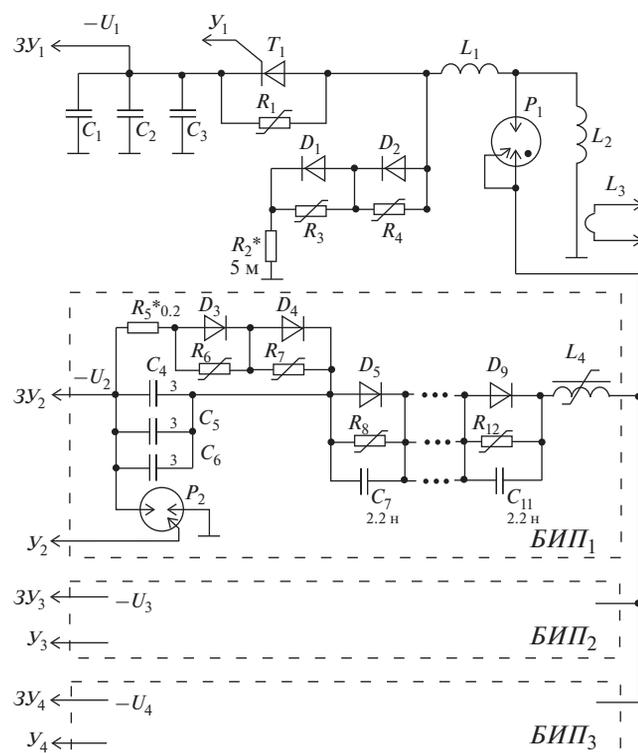


Рис. 1. Схема силовой части установки. $3U_1-3U_4$ – зарядные устройства; U_1-U_4 – линии управления пусками; $БИП_1-БИП_3$ – источники обратного тока; T_1 – тиристор Т173-1600-30; D_1, D_2 – ДИ173-5000-22, D_3, D_4 – Д123-200-60, D_5-D_9 – ДЧ423-200-46; L_1 – дроссель ~ 35 мкГн, L_2 – индуктор ~ 20 мкГн, L_3 – пояс Роговского, L_4 – дроссель; P_1 – разрядник с пороговым напряжением 3 кВ, P_2 – разрядник РУ-62; C_1-C_3 – К75-100-3кВ-5600мкФ; C_4-C_6 – К75-97б-12.5кВ-1мкФ; R_1, R_3, R_4 – составные варисторы 1.2 кВ по 2 шт., R_6-R_{12} – по 3 шт; R_2 подбирается в пределах от 0 до 30 мОм, R_5 – от 0 до 0.5 Ом.

В данной работе описывается экспериментальная установка для исследования динамики деформации металлической пластины под действием комбинированного импульса магнитного поля: медленный прямой импульс магнитного поля с тремя быстрыми обратными импульсами. Параметры установки подобраны для работы с тонколистовыми (до 1 мм) стальными заготовками.

Принципиальная схема силовой части устройства представлена на рис. 1. Конденсаторная батарея прямого тока (C_1-C_3) с максимальным зарядным напряжением 3 кВ и полной емкостью 16.8 мФ (на конденсаторах К75-100-3кВ-5600 мкФ) разряжается через ключ на тиристоре T_1 (Т173-1600-30) и дроссель L_1 на индуктор L_2 . При этом импульс тока имеет времена нарастания ~ 3 мс и спада > 10 мс. Эти характеристики подобраны таким образом, чтобы магнитное поле проникало через заготов-

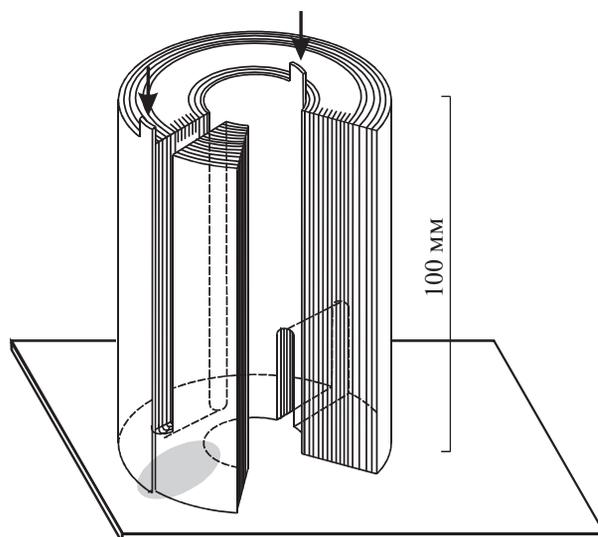


Рис. 2. Конструкция ленточного индуктора с вырезом-концентратором. Стрелками показаны электрические выводы индуктора, серым пятном обозначена область наиболее интенсивного взаимодействия индуктора и заготовки (пластина снизу).

ку, не вызывая в ней заметных пластических деформаций. Три одинаковых источника обратного тока ($БИП_1-БИП_3$) включаются последовательно по времени при достижении максимума прямого тока. Суммарная емкость конденсаторов (C_4-C_6) в каждом канале составляет 3 мкФ (конденсаторы К75-97б-12.5кВ-1мкФ), максимальное зарядное напряжение – 12 кВ. Коммутация батареи осуществляется разрядником P_2 (РУ-62) через диодный столб D_5-D_9 с малым временем восстановления (диоды ДЧ423-200-46), дроссель L_4 и неуправляемый разрядник P_1 на индуктор L_2 . Длительность нарастания импульса обратного тока составляет около 15 мкс, длительность спада – от 30 до 120 мкс. Обратные импульсы тока являются достаточно короткими, 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 L_3 . Выравнивающие варисторы $R_1, R_3, R_4, R_6-R_{12}$ выполнены составными из варисторов СН2-1а следующими номиналами: R_1, R_3, R_4 – 1.2 кВ по 2 шт., R_6-R_{12} – 1.2 кВ по 3 шт. Конденсаторы C_7-C_{11} имеют номинал 2.2 нФ.

Отметим, что резисторы в кроубарных цепях источников прямого (R_2) и обратного тока (R_5) могут подбираться для подстройки спада импульса тока. Кроубарные столбы выполнены на диодах ДИ173-5000-22 (D_1, D_2) и Д123-200-60 (D_3, D_4). Резистор R_2 изготовлен из нихромовой проволо-

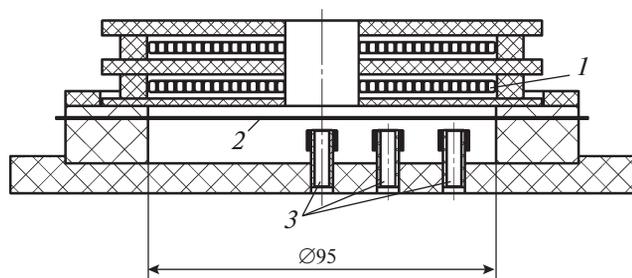


Рис. 3. Измерительный узел. 1 – плоский индуктор; 2 – металлическая заготовка (образец); 3 – индукционные датчики многоточечной системы.

ки $\varnothing 2$ мм и допускает поглощение энергии до 50 кДж за импульс. Система коммутации 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 L_1 индуктивностью ~ 35 мкГн, что немного больше индуктивности индуктора (~ 20 мкГн). Следует отметить, что в схеме на рис. 1 используются газовые разрядники и силовые полупроводниковые элементы, поэтому предпринимались специальные меры для ограничения критических скоростей нарастания прямого тока и обратного напряжения в полупроводниковых элементах. Для развязки между собой обратных импульсов тока служат диодные столбы D_5-D_9 . Поскольку импульсы тока в серии обратных импульсов могут частично перекрываться между собой, может возникнуть ситуация, когда на диодный столб, находящийся в открытом состоянии, приходит импульс обратного напряжения. Чтобы ограничить скорость нарастания обратного напряжения, параллельно выравнивающим варисторам включены конденсаторы, поглощающие избыточный заряд в диодах. Для ограничения скорости нарастания прямого тока в столбе при включении используется магнитный ключ на основе дросселя L_4 с насыщающимся сердечником. Дроссель изготовлен из двух U-образных сердечников В67345-В1-Х87. Неуправляемый отпаянный газонаполненный разрядник P_1 с пороговым напряжением 3 кВ служит для предотвращения попадания прямого тока на фронте импульса в источники обратного тока БИП₁–БИП₃.

В состав устройства входят также высоковольтные источники питания и система синхронизации, генерирующая последовательность импульсов запуска прямого тока и последовательности импульсов обратного тока. Временная диаграмма задается с точностью не хуже 100 нс.

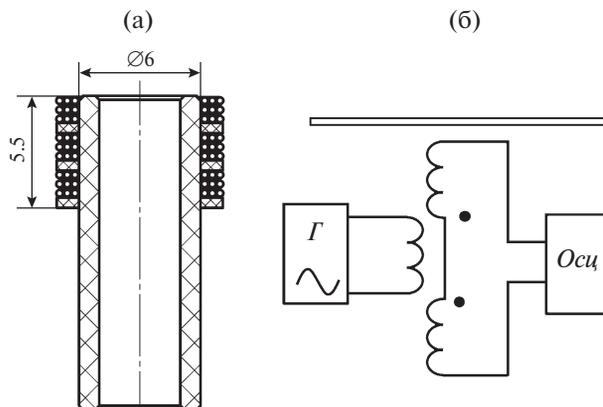


Рис. 4. Индукционный датчик перемещения: общий вид (а) и электрическая схема (б). Г – генератор синусоидального сигнала, Осц – регистрирующий осциллограф.

В качестве нагрузки использовались индукторы двух типов: плоский (двойная плоская спираль) и ленточный индуктор с вырезом-концентратором тока и магнитного поля. Плоский спиральный индуктор наматывался на стеклотекстолитовом каркасе 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 вследствие осесимметричной конфигурации магнитного поля пондеромоторная сила в заготовке на оси системы равна нулю. Это отражается на динамике движения листовой заготовки [3]. Ленточный индуктор с вырезом-концентратором [11] создает примерно равномерное давление в пятне контакта. Однако его изготовление является технологически сложным, что снижает надежность. На рис. 2 представлена конструкция ленточного индуктора с вырезом-концентратором. Он изготавливался из медной ленты шириной 100 мм со стеклотканью в качестве изолятора. Перешеек в области рабочей зоны (длинный вырез) составлял 10 мм. Предельные амплитуды импульсов прямого и обратного тока составляли 22 кА и 5 кА, которые индуцировали в рабочей области плоского индуктора пиковые магнитные поля 12 Тл и 3 Тл соответственно. Распределение магнитного поля в зазоре между индуктором и заготовкой, а также с обратной стороны заготовки, контролировалось миниатюрными индукционными датчиками, а ток в индукторе измерялся поясом Роговского. Для ленточного индуктора в области концентратора пиковые значения прямого и обратного магнитного поля были несколько ниже, чем для плоского спирального индуктора.

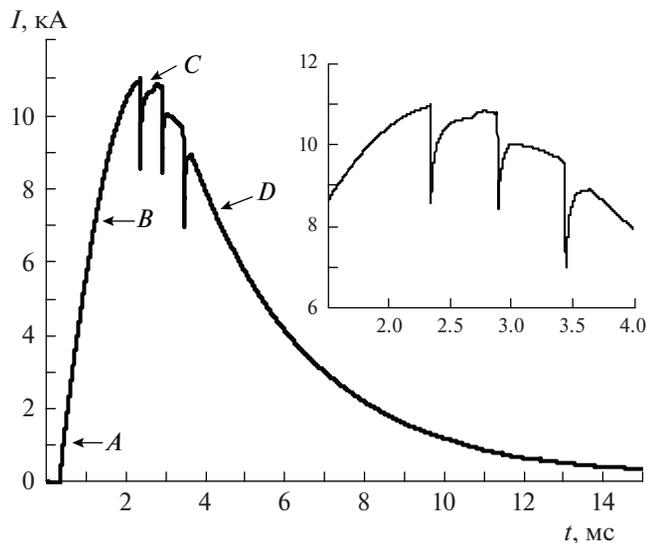


Рис. 5. Форма импульса тока в плоском индукторе со стальной заготовкой толщиной 0.5 мм (*A–D* – характерные моменты импульса). На вставке увеличенный фрагмент с последовательностью обратных импульсов тока.

Для исследования динамики заготовки использовались многоточечная индукционная методика измерения перемещения заготовки и моделирование движения металлической пластины под действием ponderomotorных сил. На рис. 3 схематично показан измерительный узел с плоским индуктором. Индуктор создавал осесимметричное импульсное магнитное поле в области заготовки, имевшей форму круглой пластины радиусом $a = 48$ мм с заземленным краем и соосной с индуктором. Три индукционных датчика перемещения располагались под пластиной в центре и на радиусах $1/3a$ и $2/3a$. Общий вид и электрическая схема датчиков показаны на рис. 4. Каждый датчик состоял из центральной катушки, подключенной к генератору синусоидального сигнала f с частотой от 2 до 5 МГц, и двух приемных одинаковых катушек со встречной намоткой, размещенных соосно на торцах центральной катушки. Датчик изготавливался на диэлектрическом каркасе $\varnothing 6$ мм и имел 9 витков в каждой катушке. При отсутствии пластины и хорошей компенсации датчика сигнал с пары приемных катушек отсутствовал вследствие их встречной намотки. При подлете пластины к одному из торцов датчика сигнал увеличивался. Зависимость амплитуды сигнала с датчика от расстояния между пластиной и торцом датчика предварительно калибровалась. Таким образом, удалось измерять поперечные перемещения пластины (деформацию) в трех точках в процессе воздействия импульсного магнитного поля на образец.

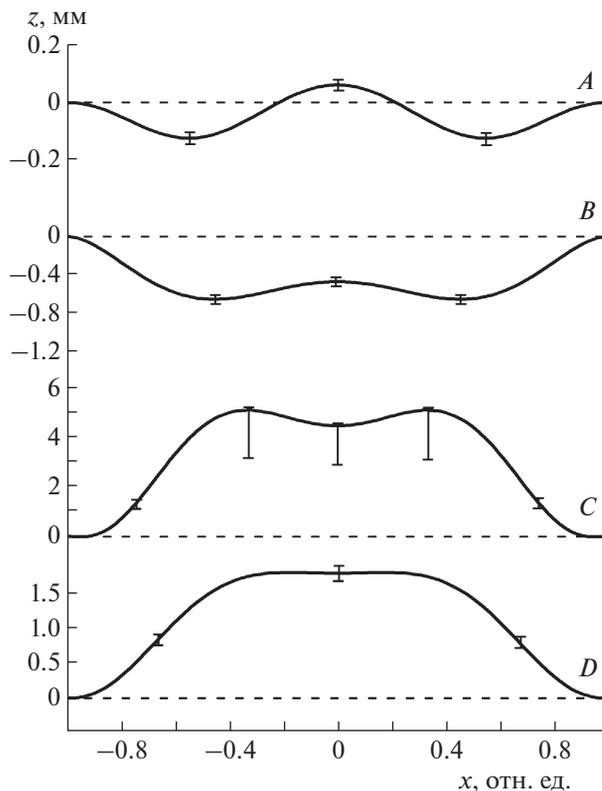


Рис. 6. Деформация пластины в различные моменты времени вдоль диаметра x (*A–D* соответствуют характерным точкам на рис. 5). Для удобства масштаб по вертикали различен.

Форма пластины в момент времени t для круглой пластины с заземленным краем при осесимметричном изгибе может быть представлена в виде разложения [12]:

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

где $z(r, t)$ – величина прогиба пластины в зависимости от радиуса r . Три индукционных датчика позволяли непрерывно измерять зависимости прогиба на трех радиусах: $z(0, t)$, $z(1/3a, t)$ и $z(2/3a, t)$. Используя разложение (1) до 3-го порядка, можно определить коэффициенты $c_n(t)$ ($n = 1, 2, 3$), т.е. восстановить форму пластины в заданный момент времени t . Число мод осесимметричных колебаний, учитываемых при реконструкции формы пластины, равно числу индукционных датчиков перемещений.

Форма импульса тока в плоском индукторе в эксперименте при зарядном напряжении в источнике прямого тока $U_1 = 1.5$ кВ и в источниках обратного тока $U_2 = 7.5$ кВ при работе со стальной

заготовкой толщиной 0.5 мм представлена на рис. 5. На нем виден прямой медленно изменяющийся импульс тока: нарастание тока при разряде конденсаторной батареи C_1-C_3 на дроссель L_1 с индуктором L_2 и аperiодическое затухание тока при включении кроубарной цепи $R_2-D_1-D_2$. Вблизи максимума прямого импульса тока видны 3 коротких обратных импульса тока, сформированных источниками $БИП_1-БИП_3$.

На рис. 6 показана динамика деформации стальной пластины под действием импульса тока в характерные моменты времени, обозначенные на рис 5. Видно, что обратный импульс тока приводит к сильному притяжению заготовки к индуктору. Показана также оценка погрешности измерения вертикального перемещения пластины. При больших прогибах пластины в направлении индуктора (вверх) погрешность резко увеличивается.

Установка продемонстрировала возможность пластической деформации при обратной магнитно-импульсной обработке листовых медных и стальных заготовок толщиной до 1 мм. Минимальное время паузы между срабатываниями устройства определяется мощностью зарядного устройства и средней рассеиваемой мощностью в индукторе. Его типичное значение составляло 2 мин.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-08-00337 и №18-48-520006 p_a) и программы повышения конкурентоспособности НИЯУ «МИФИ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hayes D.B., Hall C.A., Asay J.R., Knudson M.D. // J. Appl. Phys. 2004. V. 96. P. 5520. doi 10.1063/1.1803108
2. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитоимпульсной обработке. Харьков: Вища школа, 1977.
3. Pyska V., Risch D., Kinsey B.L., Tëkkaya A.E., Kleiner M. // J. Mater. Proc. Tech. 2011. V. 211. P. 787. doi 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012
4. Лагутин А.С., Ожогин В.И. Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Hansen K.A., Hendrickson I.G. US patent 3998081. 1976.
6. Кудасов Ю.Б. Патент на изобретение № 2558700 РФ // Оpubл. 10.08.2015. Бюл. № 22.
7. Kudasov Yu.B. PCT Patent application PCT/RU2013/001051. 2013.
8. <https://electroimpact.com/Products/Specialty/EDR/Overview.aspx>
9. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V. // J. Mater. Proc. Tech. 2013. V. 213. P. 444. doi.org 10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003
10. Кудасов Ю.Б., Маслов Д.А., Сурдин О.М. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. С. 10. doi 10.21883/PJTF.2017.02.16445
11. Hansen K.A., Hendrickson I.G. US patent 4061007. 1977.
12. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985.