

УДК 539.3

Кухарь В. Д.  
Киреева А. Е.  
Ларин С. Н.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫХ УСТАНОВОК МОДУЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

Одним из перспективных технологических процессов, обеспечивающих повышение производительности труда и качества продукции, экономию материалов и улучшения условий труда, является магнитно-импульсная обработка металлов, которая характеризуется тем, что давление на деформируемую металлическую заготовку создается непосредственным воздействием импульсного поля без участия каких-либо промежуточных сред. Метод магнитно-импульсной обработки металлов за последнее время эффективно начал использоваться для выполнения различных технологических операций: обжим и раздача трубчатых заготовок, формообразование, пробивка отверстий, сборка, сварка, пайка и целого ряда других процессов.

В то же время внедрение этого метода в производство сдерживается недостаточной стойкостью инструмента и элементов высокоэнергетического оборудования, что связано с отсутствием научно усовершенствованных математических моделей, обоснованных методик, позволяющих проводить процесс магнитно-импульсной штамповки наиболее рационально.

Данная работа посвящена описанию одного из путей повышения эффективности работы индукторов, который заключается в интенсификации процесса магнитно-импульсной обработки металлов давлением с использованием магнитно-импульсных установок модульного типа путем одновременного включения блоков конденсаторных батарей в разрядную цепь.

В настоящее время наметилась тенденция создания магнитно-импульсных установок модульного типа. Каждый модуль, которых представляет собой блок из параллельно подключенных конденсаторов, которые через разрядник соединяются с общей шиной магнитно-импульсной установки, подключенной к индуктору. Такая конструкция установки позволяет, варьируя количеством модулей, изменять энергоемкость установки в довольно широких пределах и осуществлять одновременное подключение модулей в разрядную цепь.

Ранее в работах [1, 2] были представлены математические модели, описывающие электромеханические процессы, протекающие при магнитно-импульсной обработке металлов, которые позволят исследовать систему «индуктор-заготовка-установка модульного типа».

Целью работы является повышение функционирования магнитно-импульсной установки модульного типа путем научно обоснованного выбора временного интервала подключения блоков конденсаторных батарей в разрядную цепь.

Для реализации поставленной цели была разработана математическая модель функционирования системы «установка-индуктор-заготовка» (где в качестве установки рассматривается установка модульного типа). Упрощенная электрическая схема системы «установка-индуктор-заготовка» с многоблочной магнитно-импульсной установкой имеет следующий вид (рис. 1).

На схеме приняты следующие обозначения:  $R_u$ ,  $L_u$ ,  $R_z$ ,  $L_z$  – сопротивления и собственные индуктивности индуктора и заготовки,  $L_{uz}$  – взаимная индуктивность индуктора и заготовки.

Буквами «И» и «З» обозначены соответственно контуры индуктора-установки и заготовки,  $C_i$  – емкость  $i$ -го блока конденсаторов.

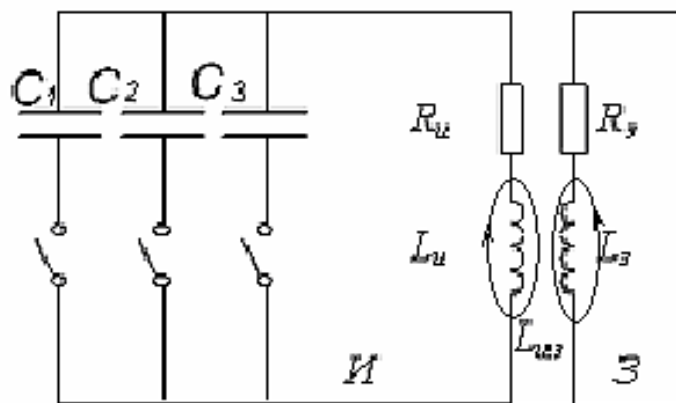


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема системы «установка-индуктор-заготовка» с многоблочной магнитно-импульсной установкой

В основу математической модели функционирования многоблочной магнитно-импульсной установки были приняты следующие гипотезы:

1) все блоки конденсаторов соединены параллельно и включаются в заданные моменты времени;

2) переходные процессы после включения очередного блока являются быстротечными, то есть включение блока конденсаторов приводит лишь к изменению емкости конденсаторной батареи и напряжения на ней.

Разбивая индуктор и заготовку на элементы, которые представляли собой замкнутый круговой контур, система дифференциальных уравнений для системы электрических контуров имеет вид:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^M L_{jk} \frac{dI_k}{dt} + \sum_{n=2}^N A(j,n) \frac{d\lambda_{n-1}}{dt} - A(j,1) \frac{d\lambda_{n-1}}{dt} &= U_C - R_j I_j; \\ \sum_{k=1}^M A(k,n) \frac{dI_k}{dt} - \sum_{k=1}^M A(k,1) \frac{dI_k}{dt} &= 0; \\ \frac{dU_C}{dt} &= -\frac{1}{CN} \sum_{k=1}^M I_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $L_{jk} = \begin{cases} \text{собственная индуктивность при } j = k; \\ \text{взаимная индуктивность при } j \neq k \end{cases}$ ;

$I_k$  – ток в  $k$ -м контуре индуктора;

$R_j$  – сопротивление  $j$ -го контура;

$M$  – число контуров (элементов) с неизвестными токами;

$j, k = \overline{1, n}$ ;

$A(j, n) = \begin{cases} 1, \text{ если элемент } j \text{ принадлежит витку } n \\ 0, \text{ если элемент } j \text{ не принадлежит витку } n \end{cases}$ ;

$N$  – количество витков;

$n$  – номер витка,  $n = \overline{1, N}$ ;

$C$  – суммарная емкость конденсаторной батареи;

$U_C$  – текущее напряжение на конденсаторной батарее.

На основе закона сохранения заряда и принятых гипотез получены соотношения для эквивалентной емкости включенных на данный момент блоков конденсаторов и напряжения на них:

$$C = \sum_{i=1}^Q C_i, \quad (2)$$

$$U_{Cj} = \frac{C_Q U_0 + U_C^{Q-1} \sum_{i=1}^{Q-1} C_i}{C}. \quad (3)$$

При одновременном разряде блоков конденсаторных батарей в систему уравнений (1) необходимо в каждый момент времени подставлять соответствующую суммарную емкость конденсаторной батареи (2). Так как при включении очередного блока конденсаторов происходит перераспределение заряда во всей блоках, необходимо скорректировать текущее значение напряжения на конденсаторной батарее.

На базе разработанной математической модели была проведена серия численных экспериментов по исследованию влияния одновременного включения блоков конденсаторных батарей на эффективность процесса обжима трубчатых заготовок из алюминиевого сплава АМг2М диаметром 27 мм 57 мм, 87 мм и толщиной 1,2 мм одновитковым, четырехвитковым цилиндрическим, индуктором-концентратором [3], геометрические размеры которых представлены на рис. 2.

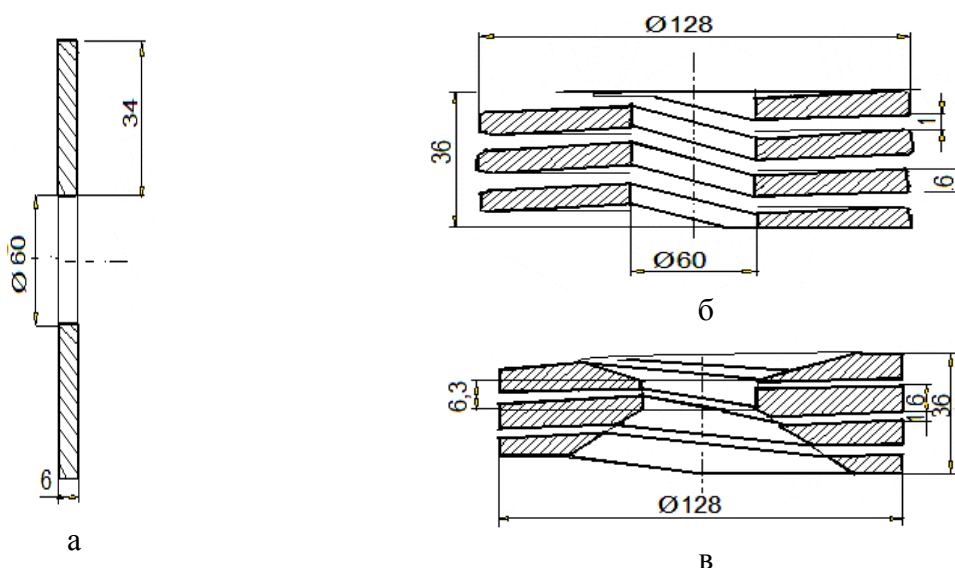


Рис. 2. Геометрические размеры спиралей индукторов:

а – одновиткового цилиндрического; б – цилиндрического (четыревиткового); в – индуктора-концентратора

При математическом моделировании принималось, что магнитно-импульсная установка имеет следующие характеристики:

ёмкость .....  $C = 1120$  мкФ;

собственная частота установки ....  $f = 15923$  Гц;

индуктивность .....  $L = 0,0917$  мкГн;

сопротивление .....  $R = 9,6$  мОм.

Принималось, что установка состоит из трех блоков конденсаторных батарей одинаковой энергоемкостью, которые могут разряжаться в различные моменты времени.

Напряжение заряда установки было выбрано таким образом, чтобы при одновременном разряде конденсаторных батарей заготовка деформировалась до постоянной степени деформации (8 %).

Рассмотрим подробно анализ подключения конденсаторных батарей при обжиге одновитковым индуктором заготовки диаметром 27 мм.

В начале рассматривался вариант, когда все конденсаторные батареи включались одновременно. Характерные графики силы тока, скорости и ускорения заготовки представлены на рис. 3.

На втором этапе рассматривался вариант подключения одновременно двух блоков конденсаторных батарей через промежуток времени равный 20 мкс (момент времени соответствующий максимуму скорости при одновременном разряде трех блоков конденсаторов) после начала разряда первого блока, при этом деформация составила 6,6 %. На третьем этапе рассматривался вариант подключения одновременно двух блоков конденсаторных батарей через промежуток времени равный 10 мкс (момент времени соответствующий максимуму ускорения при одновременном разряде трех блоков конденсаторов) после начала разряда первого блока, при этом деформация составила 9,7 %.

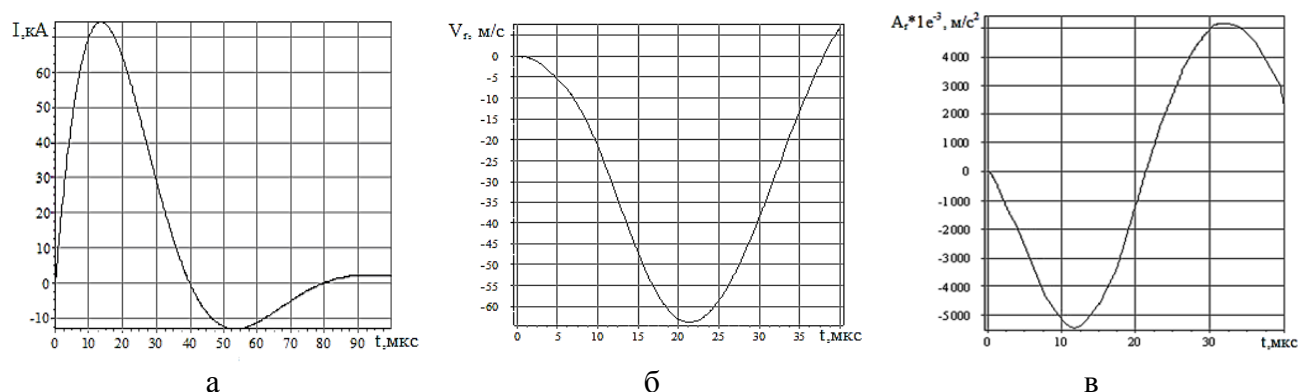


Рис. 3. Зависимости силы тока (а), скорости (б) и ускорения (в) заготовки от времени при обжиге одновитковым индуктором заготовки диаметром 27 мм на установке с параметрами второго разрядного контура

На четвертом этапе рассматривалось одновременное включение двух блоков конденсатора в момент времени равный 5 мкс, после разряда первого блока. В этом случае деформация составила 9,8 %. На пятом этапе рассматривался вариант, когда первый конденсатор включали в начальный момент времени, второй в момент времени равный 5 мкс, а третий в момент времени равный 10 мкс деформация составила 11,3 %. На шестом этапе рассматривался вариант, когда первый конденсатор включали в начальный момент времени, а второй во время, равное времени равный 7,5 мкс, третий в момент времени, равный 10 мкс деформация составила 10,7 %.

Остальные варианты подключения блоков конденсаторных батарей показали меньшие значения относительной деформации по сравнению с вариантом, когда первый конденсатор включали в начальный момент времени, второй в момент времени равный 5 мкс, а третий в момент времени равный 10 мкс.

Аналогичная картина наблюдалась для всех типов индукторов и диаметров заготовки.

Для объяснения полученного результата были рассмотрены кривые тока и ускорения, которые реализуются при включении одного, двух, трех конденсаторных батарей в моменты времени соответствующие наилучшему варианту порядка включения, которые приведены на рис 4, а–в.

Из (рис. 4, а) следует, что максимум ускорения после включения одного блока конденсаторов реализуется как раз в момент соответствующий 5 мкс. Если в этот момент времени подключить второй блок конденсаторов, то максимальное ускорение в этом случае будет соответствовать моменту времени 10 мкс (рис. 4, б). Поэтому включение третьего блока конденсаторов в этот момент времени приводит к наилучшему результату (рис. 4, в).

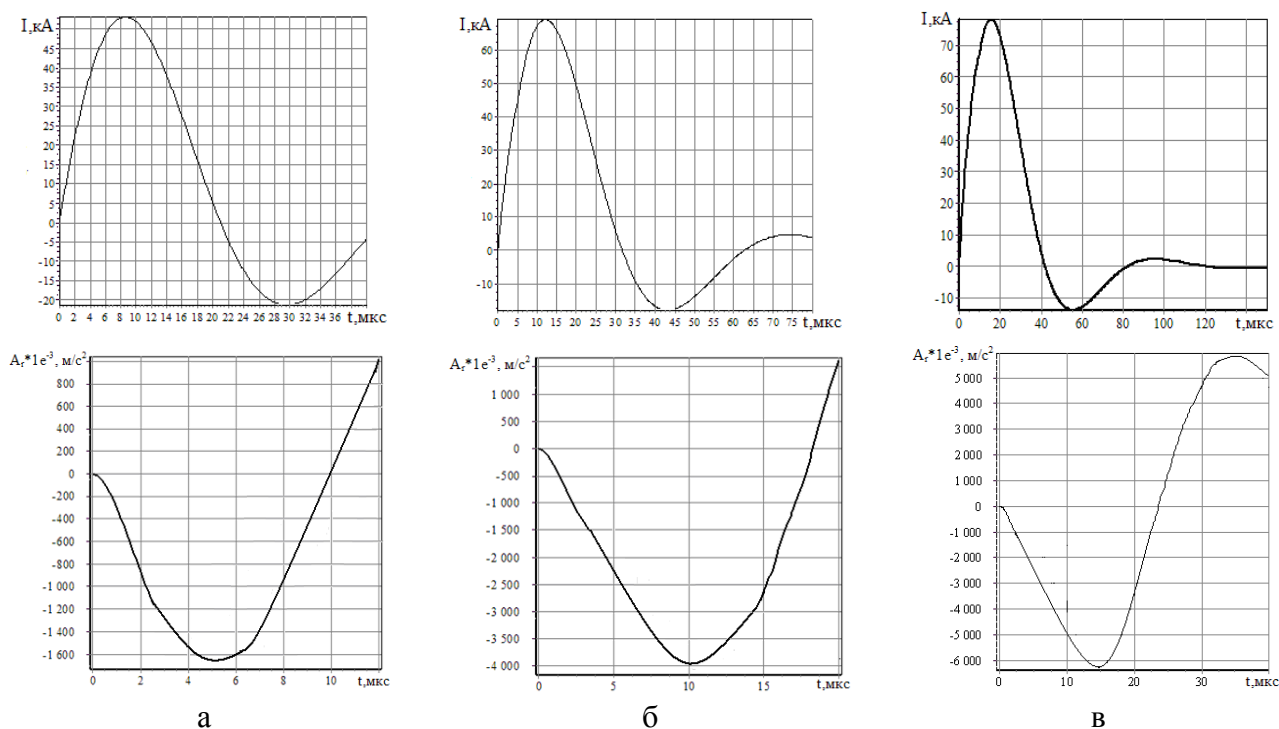


Рис. 4. Зависимость силы тока и ускорение заготовки во времени при обжиге одновитковым индуктором заготовки диаметром 27 мм на установке с параметрами второго разрядного контура при включении:

а – одного конденсаторного блока; б – первого конденсаторного блока в начальный момент времени, а второго через 5 мкс; в – первого конденсаторного блока в начальный момент времени, второго через 5 мкс, третьего через 10 мкс

## ВЫВОДЫ

Таким образом, очевидно, что для достижения наилучшего результата необходимо производить очередное подключение конденсаторных батарей в момент времени, когда ускорение достигает максимального значения. Полученный результат также свидетельствует о том, что, управляя очередностью разряда блоков конденсаторов, можно значительно повысить эффективность процессов магнитно-импульсной штамповки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухарь В. Д. *Математическое моделирование процессов магнитно-импульсной обработки* : монография. В 2 ч. Ч. I. *Механика пластического формоизменения в процессах магнитно-импульсной обработки* / В. Д. Кухарь, Е. М. Селедкин, А. Е. Киреева. – Тула : ТулГУ, 2009. – 160 с.
2. Кухарь В. Д. *Математическое моделирование процессов магнитно-импульсной обработки* : монография. В 2 ч. Ч. II. *Электромеханические процессы в системе «установка-индуктор-заготовка»* / В. Д. Кухарь, А. Е. Киреева. – Тула : Издательство ТулГУ, 2011. – 90 с.
3. Талалаев А. К. *Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов* / А. К. Талалаев. – М. : Информтехника, 1992. – 143 с.

Кухарь В. Д. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТулГУ;

Киреева А. Е. – канд. техн. наук, доц. ТулГУ;

Ларин С. Н. – канд. техн. наук, доц., декан ТулГУ.

ТулГУ – Тульский государственный университет, г. Тула, Россия.

E-mail: kirealena@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 11.03.2013 г.