

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ФОРМОВКИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ПРОСАЧИВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СКВОЗЬ ЗАГОТОВКУ

© 2020 Д.Г. Черников¹, В.Ф. Карпухин¹, В.А. Глущенков^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

² Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 03.04.2020

В данной работе представлены результаты исследования процесса магнитно-импульсной формовки листовых заготовок, которые включали расчет процесса по инженерной методике, его компьютерное моделирование с помощью программного комплекса LS-DYNA и экспериментальную отработку операции. Цель работы – определить допустимую область применения инженерной методики расчета процессов магнитно-импульсной формовки тонкостенных деталей и возможность совместного использования инженерной методики и комплекса LS-DYNA для разработки процессов магнитно-импульсной формовки. В результате исследований установлено, что инженерная методика позволяет рассчитывать процессы с достаточной точностью при толщине заготовки, превышающей значение глубины проникновения импульсного магнитного поля в материал заготовки, а результаты расчетов могут являться начальными данными для более точного моделирования процесса с помощью программного комплекса LS-DYNA.

Ключевые слова: магнитно-импульсная формовка, индуктор, скин-слой, частота разрядного тока.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-75-80

ВВЕДЕНИЕ

Расчет процессов магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) [1,2] может осуществляться по инженерным методикам, основанным на использовании аналитических формул, либо численными методами. Численные методы используют меньше допущений, что позволяет получить более точные результаты. Компьютерное моделирование различных процессов МИОМ чаще всего осуществляется с помощью конечно-элементного программного комплекса LS-DYNA [3,4], который позволяет учитывать взаимосвязанные явления электромагнетизма, тепла и механики [5].

Недостатками компьютерного моделирования в данном случае является возможность решения только прямой задачи, то есть определение конечного результата по заданным начальным параметрам и большое время решения задачи. Это затрудняет выбор оптимальных начальных параметров процесса.

В работе [6] описана инженерная методика расчета процессов МИОМ, которая позволяет

Черников Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогрессивных технологических процессов пластического деформирования. E-mail: chernikov.dg@ssau.ru

Карпухин Владимир Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогрессивных технологических процессов пластического деформирования. E-mail: nil41vf@mail.ru

Глущенков Владимир Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением Самарского университета. Начальник отдела СамНЦ РАН. E-mail: vgl@ssau.ru

выбрать оптимальную конфигурацию индуктора и рассчитать режим обработки по заданным размерам заготовки и готовой детали. Основные элементы данной методики изложены в работе [7]. Расчет процессов осуществляется по аналитическим формулам, поэтому время решения задачи не превышает нескольких секунд. Это позволяет за короткое время провести анализ большого количества вариантов выполнения технологического процесса. Однако она имеет ограниченное применение, так как использует допущение, что магнитное поле полностью затухает в стенке заготовки, поэтому может давать существенную ошибку при расчете процессов деформирования тонкостенных заготовок.

Сократить время расчета при высокой точности полученных результатов возможно, если с помощью инженерной методики провести предварительный расчет процесса, а затем, используя программный комплекс LS-DYNA, провести моделирование процесса и уточнить оптимальные значения параметров процесса.

Цель работы: определение области, в которой расчеты по инженерной методике, изложенной в работе [6], обеспечивают приемлемый по точности результат и возможности использования этих результатов для уточняющего расчета с использованием комплекса LS-DYNA.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения поставленной цели проводился комплекс исследований по формовке кольцевого рифта на плоских заготовках. Исследования включали проведение экспериментов,

расчеты по инженерной методике и компьютерное моделирование процесса. При проведении экспериментов фиксировались параметры разрядного тока и высота полученного рифта. После этого по инженерной методике рассчитывались параметры разрядного тока и энергия, необходимая для формовки рифта, высотой равной результатам эксперимента. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными. Компьютерное моделирование процесса формовки рифта проводилось при значениях начальных параметров, полученных при проведении экспериментов.

Схема проведения экспериментов представлена на рис. 1, где справа от оси симметрии показана исходная форма заготовки, а слева – форма заготовки после выполнения операции.

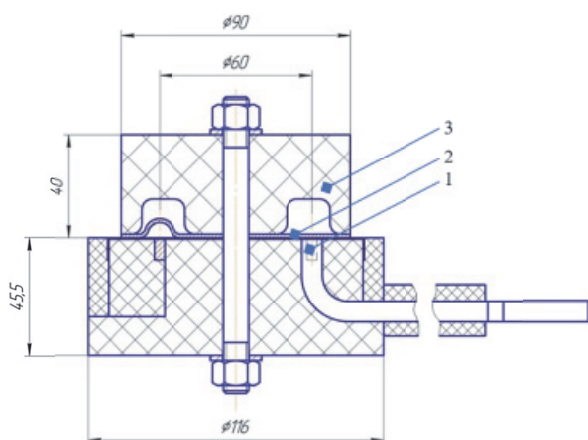


Рис. 1. Схема проведения эксперимента:
1 – индуктор; 2 – заготовка; 3 – матрица

Эксперименты проводились с помощью одновиткового индуктора 1, который позволял получать кольцевой рифт на листовой заготовке 2. Диаметр центров рифта составлял 60 мм. Толщина листовых заготовок из алюминиевого сплава АД1М изменялась от 0,18 до 1,5 мм. Питание индуктора осуществлялось магнитно-импульсной установкой [8], имеющей максимальную энергоемкость $W=15$ кДж и собственную частоту разрядного тока $f_0=53$ кГц. Формовка кольцевого рифта для каждой толщины заготовки проводилась на трех режимах. Выбирались такие режимы обработки, которые исключали возможность соударения заготовки 2 с внутренней поверхностью матрицы 3. Это позволяло установить более четкую взаимосвязь между начальными параметрами процесса и его результатами.

В основе определения режима выполнения операции по рассматриваемой инженерной методике лежит расчетная величина скорости разгона заготовки V_c , обеспечивающая необходимую удельную работу деформации заготовки a_s , которая определяется по выражению [7]:

$$V_c = \sqrt{\frac{2a_s}{\rho}}, \quad (1)$$

где a_s – усредненная величина удельной работы деформации заготовки, необходимой для выполнения заданной операции;

ρ – плотность материала заготовки.

В зависимости от выполняемой операции используются различные варианты расчета необходимой величины давления импульсного магнитного поля (ИМП). Если выполнение операции связано с большими перемещениями заготовки, то величина необходимого амплитуды давления ИМП рассчитывается по выражению:

$$P_m = 4,4 \cdot V_c \cdot f_w \cdot \rho \cdot s, \quad (2)$$

где f_w – рабочая частота разрядного тока;
 s – толщина заготовки.

Данная формула применима, если величина зазора между заготовкой и матрицей δ больше величины перемещений заготовки h_a к моменту времени $t = 3/8T$, где T – период колебаний разрядного тока. Величина h_a определяется по выражению:

$$h_a = 0,141 \frac{V_c}{f_w}, \quad (3)$$

При выполнении операций, связанных с малыми перемещениями заготовки, для расчета необходимой амплитуды давления ИМП используется выражение, полученное для линейной аппроксимации давления ИМП от времени [6]:

$$P_m = \frac{V_c^3 \cdot \rho \cdot s}{18 \cdot \delta^2}. \quad (4)$$

Выражение (4) может использоваться в том случае, когда процесс заканчивается в течение первой четверти периода колебаний разрядного тока. Это условие выполняется, если величина начального зазора δ между заготовкой и матрицей удовлетворяет соотношению:

$$\delta < \frac{V_c}{12 \cdot f_w}. \quad (5)$$

При проведении экспериментов формовка рифта проводилась без соударения заготовки о матрицу, поэтому расчет необходимой величины давления ИМП проводился с использованием выражения (2).

Следует отметить, что при расчете по инженерной методике определяется оптимальное по эффективности количество витков индуктора, однако расчет ведется в диалоговом режиме, что позволяет задавать при расчете любые параметры индуктора. При проведении исследований использовался одновитковый индуктор, так как он обеспечивает постоянство параметров давления импульсного магнитного поля по периметру, за исключением участка подключения токоподводов.

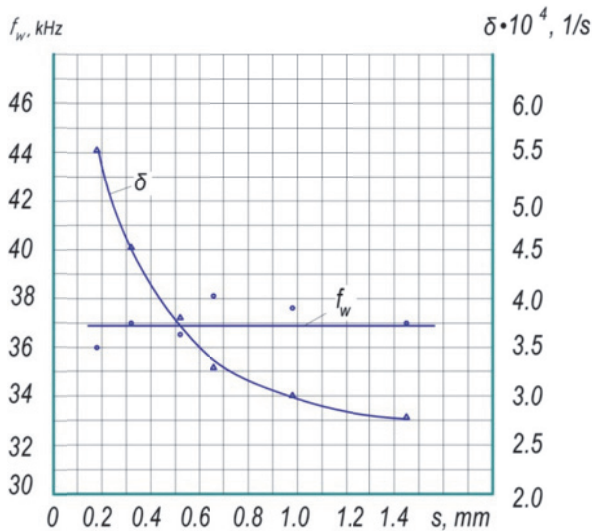


Рис. 2. Зависимость частоты колебаний и декремента затухания разрядного тока от толщины заготовки

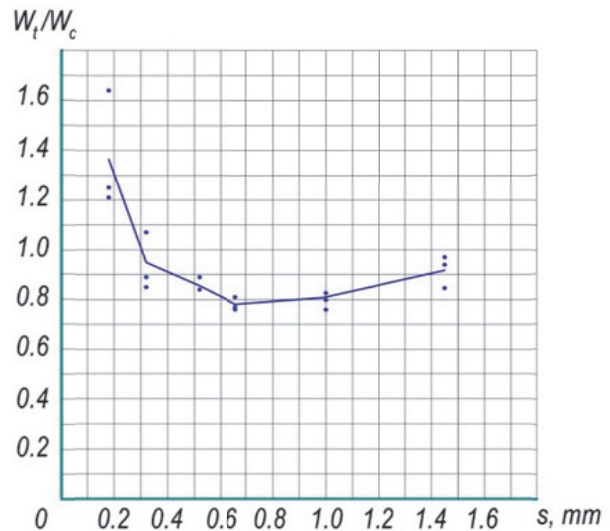


Рис. 3. Зависимость отношения экспериментальных и расчетных величин энергии разряда от толщины заготовки

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обработка результатов замеров параметров разрядного тока, представленных на рис. 2, показала, что рабочая частота разрядного тока f_w не зависит от толщины заготовки и составляет 36,9 кГц. Отклонение замеренных величин от данного значения не превышает 3%. Следовательно, глубина проникновения импульсного магнитного поля в материал заготовки $b_p = 0,44$ мм. Значение рабочей частоты разрядного тока, полученное в процессе расчета по инженерной методике, составляет 37,4 кГц.

Из результатов измерений, представленных на рис. 2, следует, что декремент затухания разрядного тока существенно возрастает по мере уменьшения толщины стенки заготовки, что объясняется ростом активного сопротивления в заготовке.

После проведения экспериментов измерялась высота рифта и по инженерной методике рассчитывалась величина энергии разряда магнитно-импульсной установки, необходимая для получения данной высоты рифта, которая сравнивалась с экспериментальным значением. Результаты сравнения величин энергии разряда установки, полученных в эксперименте W_t и рассчитанных по инженерной методике W_c , которые обеспечивают одинаковую высоту рифта, представлены на рис. 3.

Анализ полученных результатов показывает, что при толщине заготовки, превышающей значение глубины проникновения магнитного поля в материал заготовки, расчет по инженерной методике дает достаточно точные результаты. А при толщине заготовки меньше величины скин-слоя величина ошибки становится значительной. Следовательно, использовать инженерную мето-

дику целесообразно использовать при толщине заготовки, превышающей глубину проникновения магнитного поля в материал заготовки.

Сопоставление результатов экспериментов и расчетов по инженерной методике показало, что рассчитанные по инженерной методике параметры разрядного тока отличаются от экспериментальных значений не более, чем на 15%. Следовательно, целесообразно расчет технологических процессов проводить в два этапа. На первом этапе, используя инженерную методiku выбрать оптимальные параметры индуктора и рассчитать необходимые параметры разрядного тока, близкие к оптимальным значениям. А на втором этапе провести уточняющий расчет оптимальных параметров процесса с использованием вычислительного комплекса LS-DYNA.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

Для описания материала заготовки (сплав АД1М) использовалась модель MAT_POWER_LAW_PLASTICITY [9]. Данная модель предполагает материал изотропным и позволяет учитывать деформационное и скоростное упрочнение металлов. Зависимость между напряжением текучести σ_s и интенсивностью тензора логарифмических деформаций ϵ_1 для данного материала задавалась степенным соотношением

$$\sigma_s = K_d B \epsilon_1^m, \quad (6)$$

где K_d – корректирующий коэффициент динамичности; $K_d = 2,866$ [10].

B, m – параметры кривой деформационного упрочнения [10].

Материал токопровода индуктора (медный сплав М1) задавался моделью MAT_ELASTIC, ма-

трицы (текстолит) – MAT_RIGID [9]. Для работы электромагнитного решателя LS-DYNA [5] задавались дополнительные карты, в том числе с моделью материала EM_MAT_001 для задания электрической проводимости проводников – заготовки и токопровода индуктора.

В табл. 1 приведены характеристики материалов заготовки, индуктора и матрицы.

На рис. 4 показаны картины силовых линий

магнитного поля индуктора для разных толщин материала заготовки.

Из рисунка видно, что при толщине заготовки меньше величины скин-слоя происходит просачивание магнитного поля сквозь нее и наоборот, при толщине заготовки больше величины скин-слоя происходит полное экранирование магнитного поля. Именно этот эффект не позволяет получить точные результаты расчета параметров

Таблица 1. Характеристики материалов заготовки, индуктора и матрицы, задаваемые в моделях материалов

Модель материала	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Параметры кривой деформационного упрочнения		Электрическая проводимость, См/м
				B, МПа	m	
Заготовка						
*MAT_POWER_LAW_PLASTICITY	2700	0,71·10 ⁵	0,33	504	0,27	-
*EM_MAT_001	-	-	-	-	-	34,2·10 ⁶
Индуктор						
*MAT_ELASTIC	8960	1,23·10 ⁵	0,35	-	-	-
*EM_MAT_001	-	-	-	-	-	56,2·10 ⁶
Матрица						
*MAT_RIGID	1400	0,1·10 ⁵	0,11	-	-	-

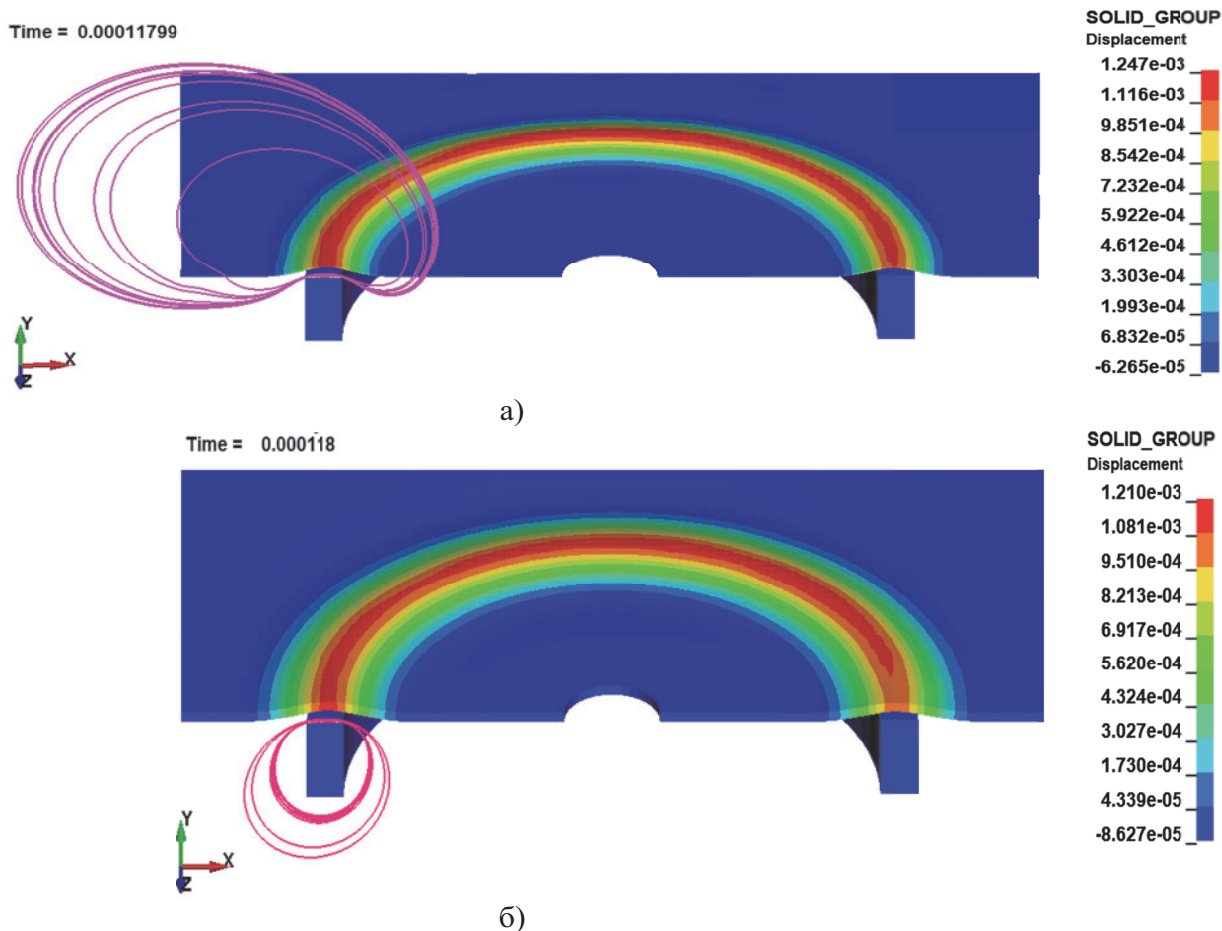


Рис. 4. Картины силовых линий магнитных полей индуктора для разных толщин заготовки: а – 0,18 мм; б – 1 мм

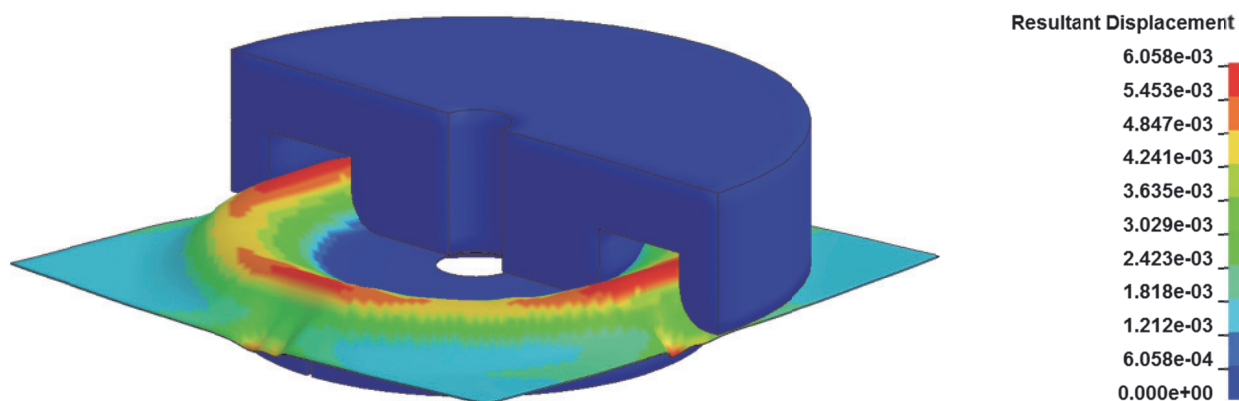


Рис. 5. Высота гофра при толщине заготовки равной 0,18 мм

Таблица 2. Сопоставление результатов эксперимента с результатами компьютерного моделирования

Толщина заготовки S , мм	1,5	1,0	0,5	0,3	0,18
Энергия разряда, кДж	1,59	0,81	0,45	0,3	0,2
Высота гофра (моделирование), H_{LSD} , мм	5,35	4,56	4,9	4,54	4,14
Высота гофра (эксперимент), H_e , мм	6,1	5,65	4,7	4,5	3,4

процессов МИОМ с использованием инженерных методик расчета. В то время как комплекс LS-DYNA позволяет учесть данный эффект.

На рис. 5, в качестве примера, показан полученный гофр при толщине заготовки равной 0,18 мм.

Моделирование процесса с помощью комплекса LS-DYNA дало результаты, хорошо согласующиеся с замерами высоты гофра, полученными при проведении экспериментов (табл. 2).

Разница рассчитанных и полученных в экспериментах высот гофра достаточно близки и вполне согласуются с точностью задания начальных параметров процесса. При этом разброс разницы между рассчитанными и измеренными величинами высоты гофра колеблется в узких пределах во всем диапазоне изменения толщин заготовок и режимов обработки.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Инженерная методика позволяет с достаточной точностью рассчитывать процессы магнитно-импульсной формовки при толщине заготовки, превышающей глубину проникновения магнитного поля в материал заготовки.

2. Комплекс LS-DYNA позволяет моделировать процессы магнитно-импульсной формовки и при толщине заготовки значительно меньше величины глубины проникновения магнитного

поля в материал заготовки.

3. Параметры разрядного тока, рассчитанные по инженерной методике, могут быть использованы для уточняющего моделирования процесса с помощью комплекса LS-DYNA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белый, И.В.* Справочник по МИОМ [Текст] / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: Вища школа, 1977 – 168 с.
2. *Psyka, V., Rischa, D., Kinseyb, B., Tekkayaa, A., Kleinera, M.,* 2011. Electromagnetic forming -A review, Journal of Materials Processing Technology 211, 787–829.
3. *Hallquist J.O.* LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.
4. *Mamutov, A.V., Mamutov, V.S.* Finite element simulation of sheet metal forming using LS-DYNA code // Proceedings of SPIE. 2005 Vol. 6253 P. 0G1 – 0G4.
5. *L'Eplattenier P., Cook G., Ashcraft C.* Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical Thermal Electromagnetic Simulations // Proceedings of the 3 International Conference “High Speed Forming 2008”, Dortmund, 2008, p. 85-96.
6. *Глуценков В.А., Карпунин В.Ф.* Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография - Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. – 208 с.
7. *Карпунин В. Ф.* Определение параметров магнитно-импульсной формовки // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2012.

- №5 (36), часть 1. – С. 228-232.
8. Юсупов Р.Ю., Глушченков В.А. Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов: монография / Р.Ю. Юсупов, В.А. Глушченков. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2013. – 128 с.
 9. LS-DYNA keyword user`s manual volume I, II, III.
 10. Мамутов В.С. Теория обработки металлов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки: учеб. пособие / В.С. Мамутов, А.В. Мамутов. – Санкт-Петербург: изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 188 с.

STUDY OF THE PROCESS OF ELECTROMAGNETIC FORMING WITH CONSIDERATION FOR THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD PENETRATION THROUGH THE WORKPIECE

© 2020 D.G. Chernikov¹, V.F. Karpukhin¹, V.A. Glushchenkov^{1,2}

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

² Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

This paper presents the results of a study of the process of Electromagnetic forming of sheet blanks. The study included the calculation of the process by the engineering procedure, computer simulation of the process using LS-DYNA, and experimental working out the operation. The aim of this work is to determine the permissible areas of application of the engineering procedure of calculation of processes of magnetic pulse forming of thin-walled components as well as a possibility for joint use of the engineering procedure and the LS-DYNA to develop processes of Electromagnetic forming. As a result of research it was found that the engineering procedure makes it possible to calculate the processes with sufficient accuracy when the thickness of the workpiece is greater than the value of the depth of pulsed magnetic field penetration into the workpiece material, and the results of calculations can be used as initial data for more accurate simulation of the process with the LS-DYNA.

Keywords: Magnetic pulse forming, coil, skin-depth, discharge frequency.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-75-80

Dmitrii Chernikov, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor of Department of Metal Forming, Senior researcher at the Scientific Research Laboratory of Advanced Technological Processes of Plastic Deformation (SRL-41) of Samara University. E-mail: chernikov.dg@ssau.ru

Vladimir Karpukhin, Candidate Degree in Engineering, Senior Researcher at the Scientific Research Laboratory of Advanced Technological Processes of Plastic Deformation (SRL-41) of Samara University. E-mail: nil41vf@mail.ru

Vladimir Glushchenkov, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Processing of Metals Pressure, Samara University, Head of the Department of SamRC of RAS. E-mail: vgl@ssau.ru