

УДК 621.98.044

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ФОРМОВКИ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК МАЛОГО ДИАМЕТРА

© 2020 Д.Г. Черников<sup>1</sup>, В.А. Глуценков<sup>1,2</sup>, Д.В. Гусев<sup>1</sup>, И.А. Пфетцер<sup>1,3</sup>, В.К. Алехина<sup>1</sup><sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва<sup>2</sup> Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук<sup>3</sup> Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 18.08.2020

В данной работе представлены результаты оценки эффективности процесса магнитно-импульсной формовки трубчатых заготовок малого диаметра по схеме с прямым пропусканием тока, которые включали компьютерное моделирование процесса с помощью программного комплекса LS-DYNA и его экспериментальную отработку. Цель работы – определение эффективности процесса магнитно-импульсной формовки труб малого диаметра по схеме с прямым пропусканием тока по заготовке. В результате исследований установлено, что рассматриваемая схема и предложенные технологические решения по ее реализации могут быть использованы при изготовлении довольно широкой номенклатуры трубчатых деталей различных диаметров. Это снимает существующие ограничения при магнитно-импульсной формовке труб малого диаметра по традиционной схеме и способствует значительному расширению области применения магнитно-импульсных технологий. *Ключевые слова:* магнитно-импульсная формовка, индуктор, кольцевой эффект, прямое протекание тока по заготовке

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-4-21-28

### ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в машиностроении требует постоянного совершенствования существующих и разработки новых технологических процессов, обеспечивающих повышение качества и надежности продукции. Одним из направлений решения этой задачи является использование высокоскоростных методов деформирования металлов, которые позволяют повысить производительность труда, снизить себестоимость и улучшить качество продукции, что открывает путь новым решениям в области конструирования и технологий. Среди таких методов наиболее активно внедрены в промышленности процессы магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) [1, 2, 3].

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

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

*Гусев Дмитрий Вячеславович, магистрант Самарского университета. E-mail: gushidding97@mail.ru*

*Пфетцер Илья Александрович, магистрант СамГТУ, инженер лаборатории прогрессивных технологических процессов пластического деформирования Самарского университета. E-mail: pfettser.2-mmt-4@yandex.ru*

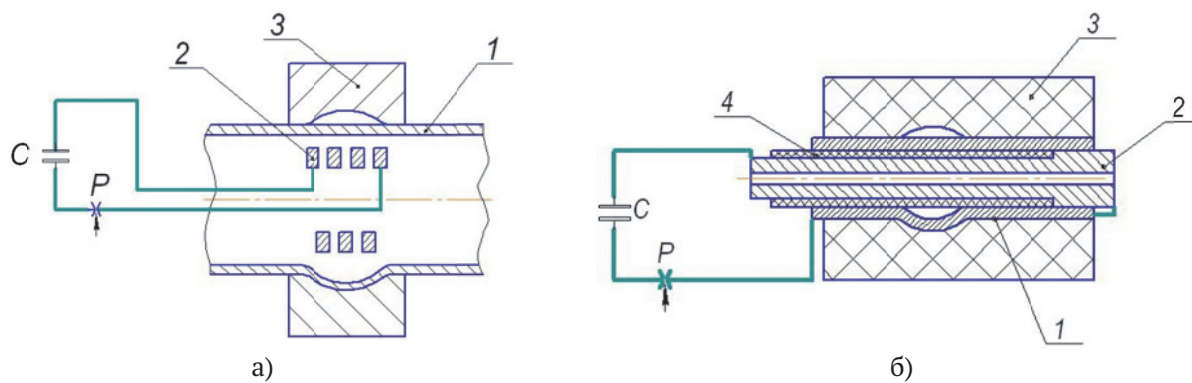
*Алехина Валентина Константиновна, младший научный сотрудник лаборатории прогрессивных технологических процессов пластического деформирования. E-mail: vgl@ssau.ru*

Это, прежде всего, связано с тем, что МИОМ характеризуется высокой точностью дозирования энергии, локальностью приложения нагрузки, отсутствием контакта инструмента с заготовкой, экологической безопасностью и легкостью встраивания оборудования в технологические линии, что выгодно ее отличает от других как высокоскоростных, так и традиционных методов обработки металлов давлением [1].

Принципиально возможны две схемы МИОМ. Они отличаются друг от друга природой протекающего по заготовке тока. Так, согласно первой схеме (рис. 1а) ток в заготовке индуцируется переменным магнитным полем индуктора, второй (рис. 1б) – разрядный ток пропускается непосредственно по заготовке [3]. На схемах, представленных на рисунке 1, сверху от оси симметрии показана исходная заготовка, снизу – форма заготовки после выполнения операции.

В настоящее время наибольшее распространение получила схема магнитно-импульсной обработки с индукционным наведением тока в заготовке. Она не требует контакта инструмента с заготовкой, поэтому отличается высокой технологичностью. По форме используемых индукторов и заготовок можно выделить три технологические схемы МИОМ: [1]

- раздача трубчатой заготовки, расположенной снаружи индуктора;
- обжим трубчатой заготовки, расположенной внутри цилиндрического индуктора;



1 – заготовка; 2 – индуктор; 3 – матрица; 4 – изолятор;  
C – батарея конденсаторов; P – коммутатор

а – схема с индукционным наведением тока в заготовке;  
б – схема с прямым пропусканием тока по заготовке

Рис. 1. Схемы магнитно-импульсной обработки металлов

- деформирование листовой заготовки плоским индуктором

При использовании схемы раздачи трубчатых заготовок во внутренней полости индуктора вследствие кольцевого эффекта [3] образуется магнитное поле, которое не совершает полезной работы по деформированию заготовки, а вызывает силовое воздействие на токопровод индуктора, что приводит к его деформации и выходу индуктора из строя. Соотношение между рабочим и паразитным полями определяется отношением площадей внутренней полости индуктора и зазора между индуктором и заготовкой. Это явление накладывает ограничение на возможности обработки труб малого диаметра по схеме раздачи. Если площадь внутренней полости индуктора будет меньше площади зазора между индуктором и заготовкой, то токопровод индуктора оказывается нагруженным раздающими усилиями, которые могут быть компенсированы только прочностными свойствами материала, из которого он изготовлен. Повышение прочности токопровода за счет увеличения высоты витков приводит к уменьшению площади внутренней полости, а, следовательно, к росту величины раздающих усилий, действующих на него, поэтому ресурс индуктора при этом не возрастает. Изготовить индуктор на раздачу, который работает по схеме индукционного наведения тока в заготовке, диаметром менее 30 мм с достаточно высоким ресурсом работы практически невозможно [3].

При использовании схемы с прямым пропусканием тока по заготовке, последняя включается в разрядную цепь магнитно-импульсной установки, то есть реализуется так называемая одноконтурная схема. В этом случае электропроводность материала заготовки в меньшей степени сказывается на эффективности процесса. Поэтому, эта схема позволяет обрабатывать детали, изготовленные из ма-

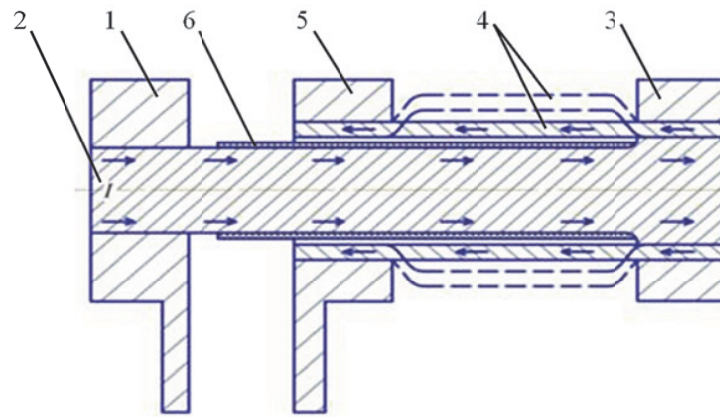
териалов с низкой электропроводностью или имеющие толщину меньше глубины проникновения магнитного поля в материал заготовки, так называемого скин-слоя. Кроме того, в данном случае индуктор представляет собой стержень, по которому протекает ток, следовательно, все недостатки первой схемы, связанные с недостаточной прочностью токопровода индуктора ей не присущи. Однако существует вероятность повреждению поверхности заготовки в зоне ее контакта с индуктором в результате искрения при перетекании тока, величина которого может достигать десятки и даже сотни килоампер.

**Цель работы:** определение эффективности процесса магнитно-импульсной формовки труб малого диаметра по схеме с прямым пропусканием тока по заготовке.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения поставленной цели была спроектирована и изготовлена упрощенная экспериментальная оснастка (рис. 2) для реализации процесса свободной формовки трубчатой заготовки из сплава АМг3, с наружным диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм. На рисунке 2 пунктирной линией показана форма заготовки после выполнения операции.

Внутри трубчатой заготовки устанавливается заизолированный цилиндрический алюминиевый стержень из сплава Д16 с утолщением на одном из его концов, для обеспечения контакта с заготовкой. Наличие изоляции исключает возможность электрического пробоя между ними на остальной части. С целью повышения надежности контакта в месте перетекания тока со стержня на заготовку используется зажимная колодка. На стержень одевается токоподающая колодка, а съем тока производится на заготовке через колодку с аналогичной конструкцией. Обе эти колодки подключаются к зажимному



1 – токоподводящая колодка; 2 – алюминиевый стержень; 3 – зажимная колодка; 4 – трубчатая заготовка; 5 – токоъемная колодка; 6 – изолирующий материал

**Рис. 2.** Схема экспериментальной оснастки с прямым протеканием тока по заготовке

устройству магнитно-импульсной установки (МИУ-50) [4].

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

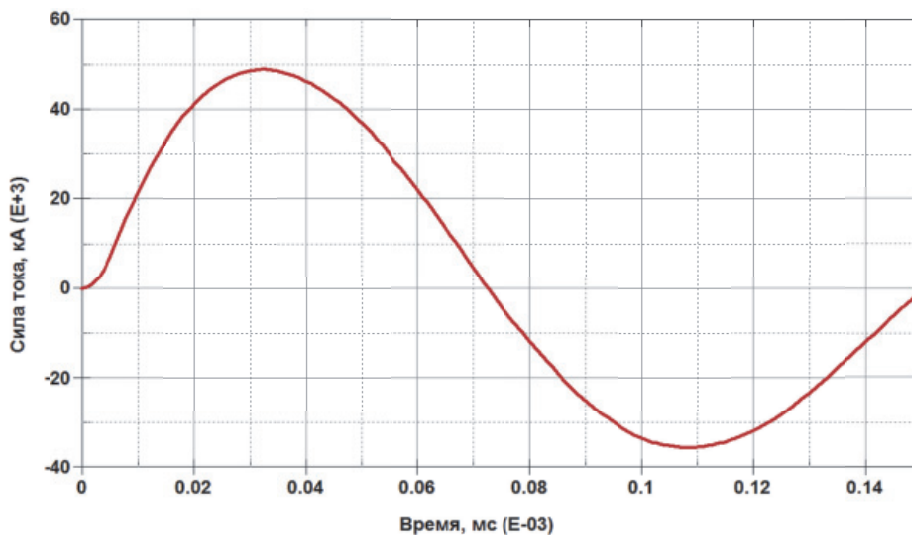
Для оценки работоспособности предлагаемого технического решения было проведено

компьютерное моделирование рассматриваемого процесса с применением многоцелевого конечно-элементного комплекса LS-DYNA [5-7]. Модели материалов и основные свойства приведены в табл. 1.

На рисунке 3 приведена токовая кривая, которая была использована при компьютерном моделировании рассматриваемого процесса.

**Таблица 1.** Характеристики материалов заготовки и стержня (индуктора), задаваемые в моделях материалов [8]

Модель материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Параметры кривой деформационного упрочнения		Электрическая проводимость, См/м
				B, МПа	n	
Заготовка						
*MAT_POWER_LAW_PLASTICITY	2700	0,71·10 <sup>5</sup>	0,33	1016	0,214	-
*EM_MAT_001	-	-	-	-	-	20,2·10 <sup>6</sup>
Стержень (индуктор)						
*MAT_ELASTIC	2770	0,72·10 <sup>5</sup>	0,33	-	-	-
*EM_MAT_001	-	-	-	-	-	23,0·10 <sup>6</sup>



**Рис. 3.** Токовая кривая

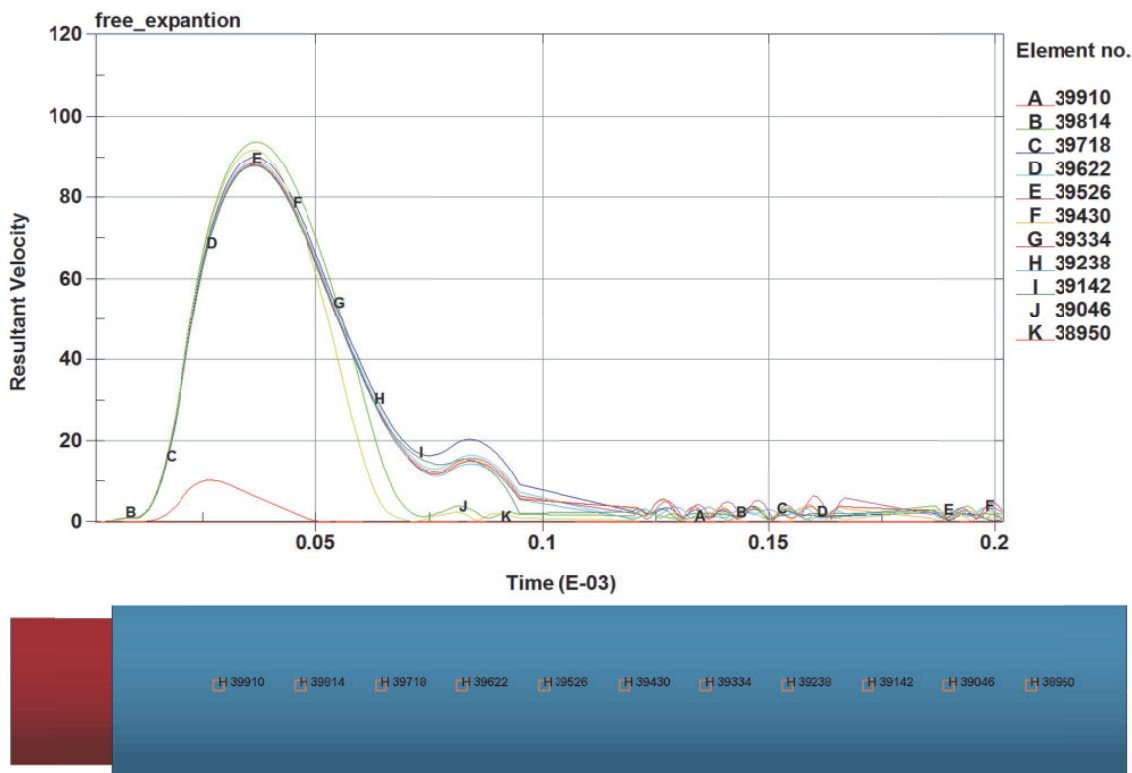


Рис. 4. Скорость перемещения характерных конечных элементов заготовки



Рис. 5. Эквивалентная пластическая деформация заготовки

Некоторые результаты компьютерного моделирования рассматриваемого процесса приведены ниже. Так, на рисунке 4 показана скорость перемещения характерных конечных элементов заготовки, составляющая порядка 90 м/с.

На рисунке 5 приведено распределение эквивалентной пластической деформации по длине заготовки спустя 100 мкс после начала процесса.

Анализируя полученные результаты компьютерного моделирования рассматриваемого процесса можно сделать вывод о работоспособности данной схемы применительно к формовке трубчатых заготовок малого диаметра.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кинематика процесса, полученная в ходе проведения экспериментов с помощью высо-

коскоростной камеры Cordin 505, показана на рисунке 6.

Сопоставление результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований кинематики процесса свободной формовки трубчатой заготовки по схеме с прямым пропусканием тока свидетельствует об их высокой сходимости.

Внешний вид полученных на различной энергии разряда МИУ-50 образцов показан на рисунке 7.

По внешнему виду образцов видно, что схема работоспособна, отсутствуют возможные дефекты (оплавление) вызванные возможным искрением в зоне контакта стержня с заготовкой вследствие перетекания тока.

Далее были проведены эксперименты по получению с помощью рассматриваемой схемы более сложной детали типа волновод



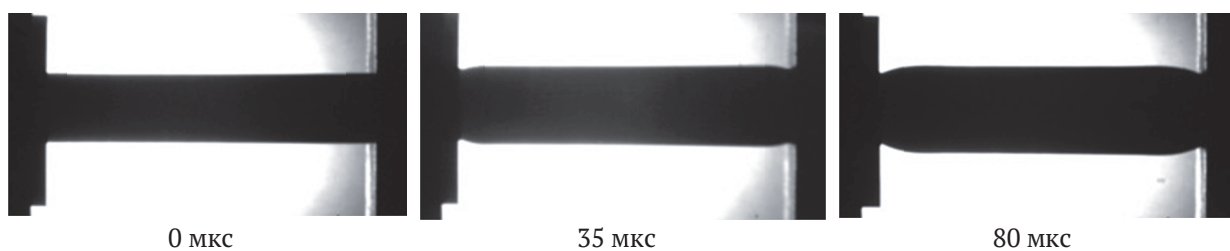
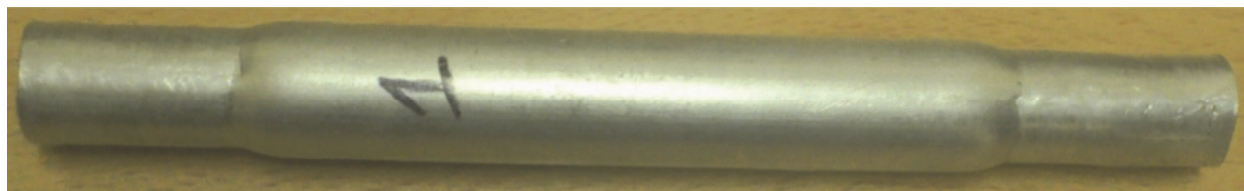
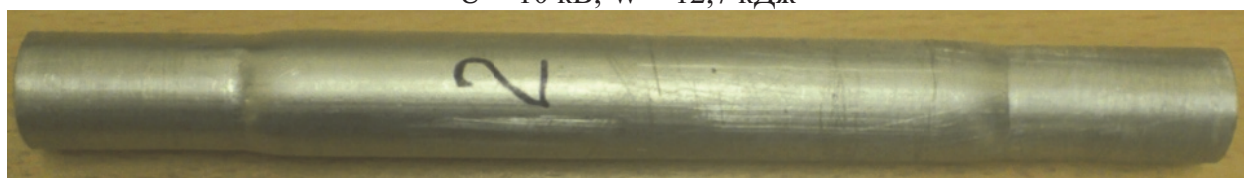


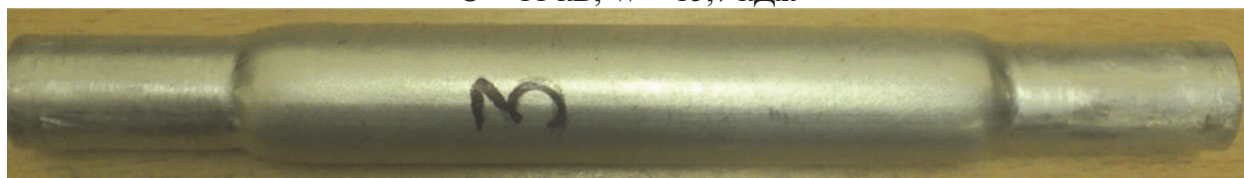
Рис. 6. Кинематика процесса свободной раздачи трубчатой заготовки



$U = 10 \text{ кВ}, W = 12,7 \text{ кДж}$

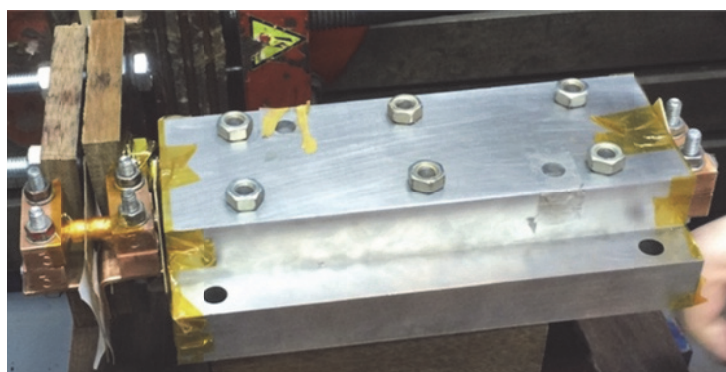


$U = 11 \text{ кВ}, W = 15,7 \text{ кДж}$

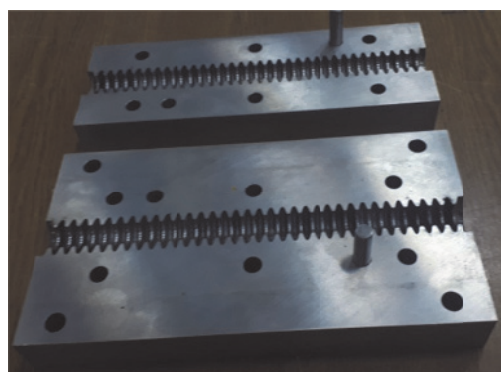


$U = 12 \text{ кВ}, W = 18,2 \text{ кДж}$

Рис. 7. Внешний вид образцов, полученных при различных параметрах магнитно-импульсного нагружения



а)



б)

а – оснастка в сборе подключенная к зажимному устройству МИУ-50;  
б – матрица в раскрытом положении

Рис. 8. Технологическая оснастка

из медного сплава М1. Наружный диаметр заготовок (рис. 8) составлял 11 мм, толщина – 0,5 мм, длина – 235 мм. Для этого была спроектирована и изготовлена специальная технологическая оснастка, показанная на рисунке 8. С целью повышения эффективности процесса стержень, а также токоподводящая, зажимная и токосъемная колодки выполнены медными.

Первые эксперименты проводились на заготовках в состоянии поставки с плавным увеличением энергии разряда МИУ-50 с 5 до 10 кДж. На рисунке 9 показан внешний вид образца, полученного при энергии разряда равной 10 кДж.

Из рисунка видно, что произошло разрушение заготовки в центральной ее части. Также были выявлены значительные неравномерно-



Рис. 9. Внешний вид образца, полученного при энергии разряда МИУ-50, равной 10 кДж

сти деформации по всей длине заготовки, что может свидетельствовать о перетекании тока с заготовки на металлическую матрицу. Для устранения выявленных дефектов все последующие эксперименты осуществлялись на отожжённых заготовках ( $T=600^{\circ}\text{C}$ ,  $t=40$  мин.). Кроме того, заготовки были заизолированы от металлической матрицы с помощью лавсановой ленты.

На рисунке 10 показан образец, полученный на той же энергии разряда (10 кДж) и с учетом выполненных вышеописанных мероприятий.

Из рисунка видно, что принятые мероприятия обеспечили равномерное протекание тока по заготовке и как следствие равномерную деформацию образца по всей его длине. Видны все

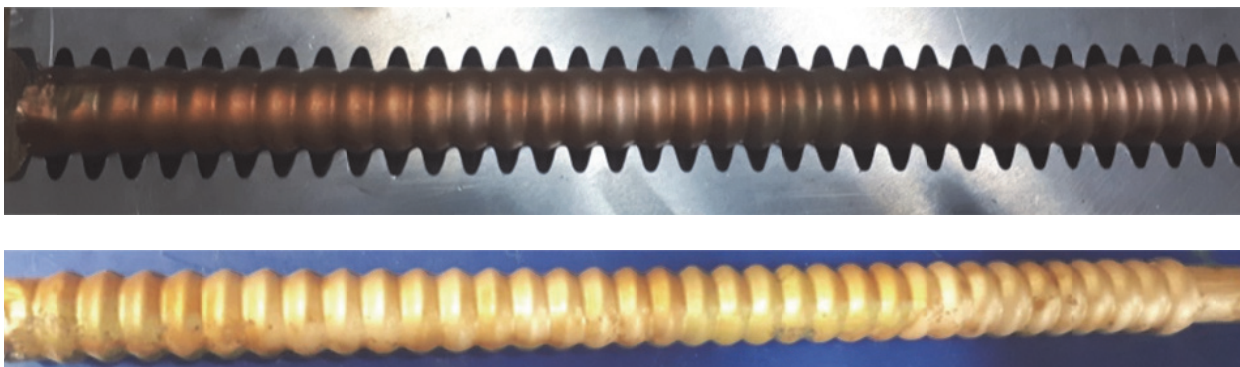
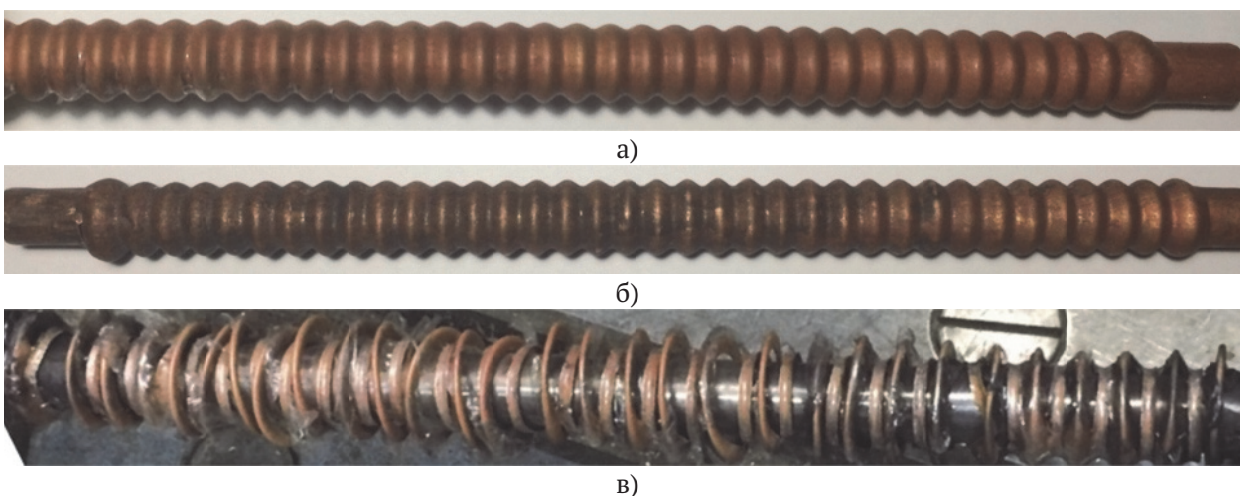


Рис. 10. Результаты эксперимента с заизолированной заготовкой в отожженном состоянии ( $W = 10$  кДж)



а –  $W=11,1$  кДж; б –  $W=12,2$  кДж; в –  $W=14,5$  кДж

Рис. 11. Внешний вид образцов, полученных при различных уровнях энергии разряда МИУ-50



**Таблица 2.** Размеры гофр образцов, полученных при различных уровнях энергии разряда МИУ-50

№ опыта	Напряжение заряда МИУ-50 U, кВ	Энергия разряда МИУ-50 W, кДж	D <sub>нач</sub> , мм	D <sub>гофр</sub> , мм
1	10,0	10,0	11,0	13,55
2	11,1	11,1		13,75
3	12,2	12,2		13,95
4	14,5	14,5		разрушение

четко оформленные гофры. Видимые разрушения образца не наблюдались.

На рисунке 11 показан внешний вид образцов, полученных на различных уровнях энергии разряда МИУ-50.

В табл. 2 приведены размеры гофр образцов, полученных при различных уровнях энергии разряда МИУ-50.

Анализ полученных результатов показал, что предельным уровнем энергии является 12,2 кДж, т.к. при следующем положении задатчика уровня напряжения МИУ-50 происходит разрушение образца по всей его длине.

### ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Апробированная схема магнитно-импульсной формовки труб малого диаметра с прямым пропусканием тока по заготовке реална и может применяться в промышленности.

2. В отличие от схемы с индукционным наведением тока в заготовке, которая позволяет обрабатывать трубы диаметром менее 30 мм лишь разовыми (разрушающимися) индукторами, схема с прямым пропусканием тока по заготовке позволяет обрабатывать трубы диаметром 5-7 мм и выше.

3. С увеличением длины обрабатываемой заготовки эффективность предлагаемой схемы формообразования возрастает, это связано с увеличением выделения энергии в системе «стержень-заготовка».

4. Предлагаемые технические решения позволяют в значительной степени расширить области использования магнитно-импульсных технологий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белый, И.В.* Справочник по МИОМ / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: Вища шко-

ла, 1977 – 168 с.

- Psyka, V., Rischa, D., Kinseyb, B., Tekkayaa, A., Kleinera, M.,* 2011. Electromagnetic forming -A review, Journal of Materials Processing Technology 211, 787–829.
- Глуценков В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография - Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. – 208 с.
- Юсунов Р.Ю., Глуценков В.А.* Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов: монография. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2013. - 128 с.
- Hallquist J.O.* LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.
- L'Epplattenier 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.
- LS-DYNA keyword user`s manual volume I, II, III.
- 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.

**EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE PROCESS  
OF ELECTROMAGNETIC FORMING OF SMALL-DIAMETER TUBES**

© 2020 D.G. Chernikov<sup>1</sup>, V.A. Glushchenkov<sup>1,2</sup>, D.V. Gusev<sup>1</sup>, I.A. Pfetzer<sup>1,3</sup>, V.K. Alyokhina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

<sup>2</sup>Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

<sup>3</sup>Samara State Technical University

This work presents results of evaluation of the efficiency of the process of pulse-magnetic forming of small-diameter tubular billets according to the scheme with direct passing the current, including the results of computer simulation of the process using the LS-DYNA software package and its experimental perfecting. The purpose of this work is to determine the efficiency of the process of pulse-magnetic forming of small-diameter tubular billets according to the scheme with direct passing the current through the billet. As a result of the research, it is established that the scheme under consideration and the proposal technological solutions for its implementation can be used in the manufacture of a rather wide range of tubular parts of various diameters. This removes the existing restrictions when pulse-magnetic forming of small-diameter pipes according to the traditional scheme and LS-DYNA contributes to a significant expansion of the fields of application of the pulse-magnetic technologies.

*Keywords:* Electromagnetic forming, coil, circular effect, scheme with direct passing the current through the billet.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-4-21-28

---

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

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

*Dmitrii Gusev, Student. E-mail: floraalshoppe777@yandex.ru*

*Ilya Pfetzer, Student. E-mail: pfettser.2-mmt-4@yandex.ru*

*Valentina Alyokhina, Associate Research Fellow at the Scientific Research Laboratory of Advanced Technological Processes of Plastic Deformation (SRL-41) of Samara University. E-mail: vgl@ssau.ru*