

УДК 621.7.044.4:621.983.5

Н. В. СТАРКОВ, Л. И. СТРЕЛКОВСКАЯ**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ**

Представлені результати експериментальних досліджень імпульсного електрогідрравлічного калібрування листових деталей з високоміцної сталі CP800, яка використовується в автомобілебудуванні. У виробництві кузовних деталей, які штампуються на механічних пресах, виникають проблеми, пов'язані з пружненням цих деталей і втратою точності їх форми після вилучення з матриці. У дослідженнях на макетних зразках показано, що ця проблема може бути вирішена введенням додаткової операції калібрування, що використовує імпульс тиску рідини, який генерується високовольтним розрядом.

Ключові слова: електрогідрравлічний, калібровка, високовольтний, розряд, тиск, пружнення, деформація, сталь, рідина, прес.

Представлены результаты экспериментальных исследований импульсной электрогидравлической калибровки листовых деталей из высокопрочной стали CP800, которая используется в автомобилестроении. В производстве кузовных деталей, которые штампуются на механических прессах, возникают проблемы, связанные с пружинением этих деталей и потерей точности их формы после извлечения из матрицы. В исследованиях на макетных образцах показано, что эта проблема может быть решена введением дополнительной операции калибровки, использующей импульс давления жидкости, который генерируется высоковольтным разрядом.

Ключевые слова: электрогидравлический, калибровка, высоковольтный, разряд, давление, пружинение, деформация, сталь, жидкость, пресс.

The results of experimental studies of pulse electrohydraulic calibration of sheet parts made of high-strength steel CP800, which is used in the automotive industry, are presented. In the production of body parts, which are formed on mechanical presses, there are problems associated with springing of these parts and the loss of accuracy of their shape after removal from the matrix. The existing methods of eliminating these drawbacks of mechanical forming are either not precise enough, or laborious, inefficient and not economical. In studies on prototypes, it is shown that this problem can be solved by introducing an additional calibration operation using a fluid pressure pulse that is generated by a high-voltage discharge. In this case, the part must be preliminarily elastically deformed in the die so that the stresses in it do not exceed the yield strength of the metal. The electrohydraulic calibration process is performed in one discharge and subsequent discharges do not increase the precision of the part. Other pulse calibration schemes are proposed that can reduce energy costs during the process.

Keywords: electrohydraulic, calibration, high voltage, discharge, pressure, springing, deformation, steel, liquid, press.

Введение. В различных отраслях машиностроения значительный объем продукции составляют изделия, содержащие как крупно-, так и малогабаритные детали, изготавливаемые штамповкой с высокой точностью из различных материалов. Влияние остаточных напряжений является одной из основных причин искажения формы и, как следствие, ухудшения эксплуатационных характеристик деталей. В этой связи возникает необходимость применения специальной технологической операции, позволяющей повысить класс точности деталей до требуемой величины, то есть калибровки.

В последние годы появилась устойчивая тенденция применения в автомобильном производстве листовых сталей с повышенными прочностными характеристиками [1]. Требования к качеству изготовления таких деталей возрастают на фоне конструктивного усложнения их формы. Такая тенденция приводит к большим проблемам в применении обычной механической штамповки, при которой неравномерность деформации материала детали напрямую связана с искажением ее формы после изготовления, обусловленного пружинением детали.

Из известных не термических технологических приемов устранения пружинения штампованных деталей наиболее распространен метод компенсации пружинения калибровкой с чеканкой углов детали.

Этот метод имеет недостаток, который заключается в том, что в одном и том же штампе в зависимости от настройки прессы может быть получена различная величина упругого пружинения [2].

В автомобилестроении используются методы, которые предусматривают штамповку с приданием детали в штампе специальной формы, например, обратный изгиб средней части детали, а повторной штамповкой за счет деформации этого участка устраняют пружинение детали [3]. Это сложный процесс устранения пружинения и он делает штамповку малопроизводительной и затратной.

По этой причине постоянно ведется поиск новых технологий и оборудования, позволяющих повысить точность штамповки деталей.

Одной из таких технологий является импульсная электрогидравлическая (ЭГ) калибровка, которая позволяет в замкнутой камере, заполненной жидкостью, создавать высоковольтные разряды с высокой удельной энергией (отношение запасаемой энергии емкостного накопителя W_0 к объему жидкости в камере $V_{ж}$), приближающейся в отдельных случаях к энергии, выделяющейся при взрыве тринитротолуола. В отличие от взрыва ЭГ калибровка позволяет регулировать интенсивность и точность приложения нагрузки к необходимым участкам детали.

Калибровка достигается за счет создания на по-

верхности детали импульсов давления высокой интенсивности. Продолжительность действия сил на заготовку исчисляется миллисекундами и, вследствие этого, нагрузка носит импульсный характер. Для процесса характерны высокие скорости деформирования и деформации металла заготовки, что влияет на напряженно-деформированное состояние металла. Такой характер нагрузки позволяет придавать деталям высокую точность формы при незначительной пластической деформации или даже при ее полном отсутствии, и, что более важно, стабилизировать эту форму благодаря эффективной релаксации напряжений и уменьшению их неравномерности в детали.

Эти качества импульсной ЭГ калибровки создают хорошие возможности для дальнейшего расширения сферы ее использования.

Цель исследований. Показать на макетных образцах возможность импульсной ЭГ калибровки деталей из высокопрочной стали, а именно, возможность устранения упругого пружинения деталей после механической штамповки и повышения точности их формы.

Объектом исследований был процесс ЭГ калибровки макетных (тестовых) образцов штампованных на механическом прессе деталей, изготовленных из высокопрочной стали СР800. Как пример, на рис. 1 изображены профили деталей под номерами 1 и 2 до и после ЭГ калибровки, а размеры всех деталей до ЭГ калибровки приведены в табл. 1. Механические характеристики стали СР800 приведены в табл. 2.

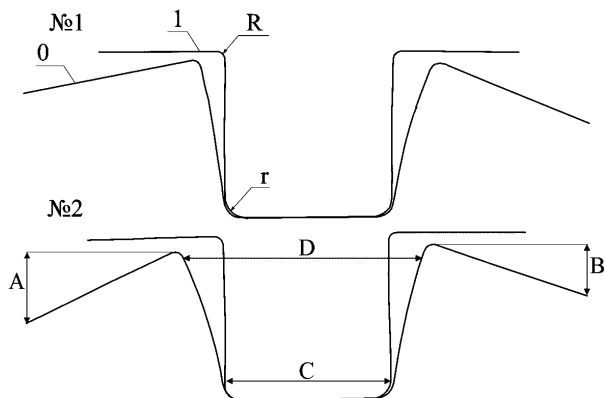


Рисунок 1 – Профили деталей:
0 - до ЭГ калибровки; 1 - после ЭГ калибровки

Таблица 1 – Размеры деталей до ЭГ калибровки

№ детали	A, мм	B, мм	A+B, мм	C, мм	D, мм
1	22	34	56	97	134
2	34	39,5	73,5	97	144
3	8,5	17	25,5	97	119
4	29	29	58	97	131
5	10	3	13	97	110
6	41	40	81	97	148
7	19	12,5	31,5	97	117
8	7	10,5	17,5	97	107
9	8	5,5	13,5	97	106,5
10	9	2	11	97	107,5
11	28	21	49	97	127
12	39	36	75	97	139

Как видно из табл. 1, все 12 образцов отличаются по форме из-за разной степени пружинения, что свидетельствует о том, что они были изготовлены при разных условиях формообразования – при разных усилиях прижима фланца, разных условиях смазки и др.

Исходная ширина полосы до механической штамповки составляла 45 мм, толщина листа – 2,03 мм.

Таблица 2 - Механические характеристики стали СР800

Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение после разрыва, %	Модуль упругости, нормальный, МПа
686	861	13,3	200000

Была разработана и изготовлена штамповая оснастка, которая позволяла калибровать одновременно 2 детали.

На рис. 2, а-б приведены фотографии штампа в собранном и разобранном состоянии с калибруемыми деталями.

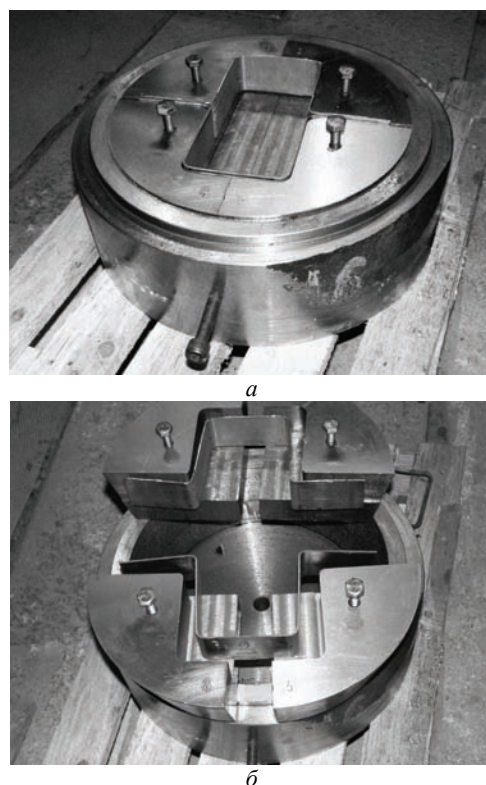


Рисунок 2 – Штамп для ЭГ калибровки деталей:
а – в собранном состоянии, б – в разобранном состоянии

Штамп состоит из разъемной матрицы в виде 4-х вкладышей, которая зажимается в обойме по конической поверхности прижимом пресса.

На рис. 3 приведена фотография ЭГ пресса модели Т1226Б, на котором проводились эксперименты, а в табл. 3 - его основные технические характеристики [7].

Для расширения технологических возможностей ЭГ пресса в экспериментах энергия в импульсе могла

быть увеличена до 60 кДж за счет дополнительной емкости конденсаторной батареи, что обеспечивало максимальную удельную энергию разряда $W_0/V_{жс}$ до 60 Дж/см³.

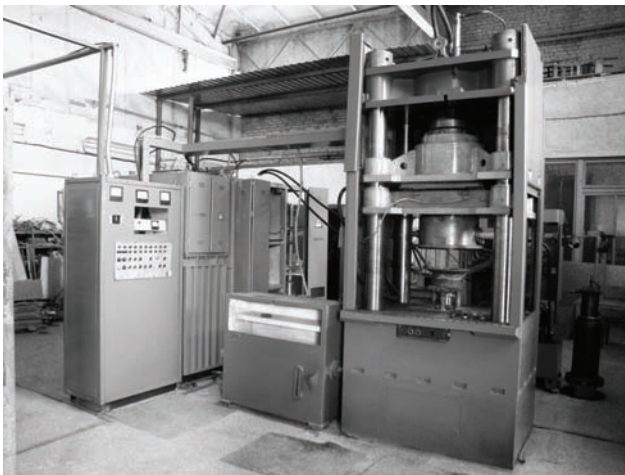


Рисунок 3 – ЭГ пресс модели T1226B

Таблица 3– Основные технические характеристики ЭГ пресса модели T1226B

Энергия в импульсе, кДж	5...40
Рабочее напряжение до, кВ	40
Частота следования импульсов, имп./с	0,25
Расстояние между колоннами в просвете, мм	800
Высота штампового пространства, мм	
– максимальная	450
– минимальная	200
Ход прижимной траверсы, мм	150
Размеры установки в плане, мм	5100x 4900
Ориентировочная производительность, дет/час	100
Масса установки, т	10

Для достижения поставленной цели экспериментальные исследования ЭГ калибровки выполняли в такой последовательности.

Обмеряли толщину стенок по длине детали, определяли ее утонение и по нему находили участки детали с наибольшей пластической деформацией. При этом было сделано предположение, что на этих участках следует ожидать наибольшие деформационное упрочнение и остаточные упругие деформации, которые приводят к пружинению и искажению формы детали. Такими участками в детали были перетяжной радиус на матрице R и угловой внутренний радиус r (см. рис. 1).

Максимальную удельную энергию приняли, исходя из расчетной величины остаточных напряжений в наружном слое заготовки $\sigma_{ост.R}$ при ее изгибе по радиусу R , которые, согласно теоремы о разгрузке [4], достигают

$$\sigma_{ост.R} = -1/2 \sigma_s, \quad (1)$$

где σ_s – напряжения текучести, МПа.

Для стали СР 800 напряжения $\sigma_s = 686$ МПа, а остаточные напряжения сжатия в стенках детали при штамповке составят $\sigma_{ост.R} = 343$ МПа.

При высоковольтном разряде в жидкости выделяющаяся энергия расходуется на работу расширения

канала, нагрев окружающей жидкости, излучение и образование продуктов распада жидкости.

При этом образуется ударная волна, максимальное давление P_m (Па) на фронте которой может быть определено по формуле [5]:

$$P_m = \frac{b(\eta) \rho_0^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{\sqrt{r} L^{3/8} l^{5/8}}, \quad (2)$$

где $b(\eta) = 0,05 [1 - 0,8 (\eta - 0,7)^2]$; η – критерий подобия, определяющий долю энергии, выделившейся в первом полупериоде ($0,4 \leq \eta \leq 1,0$ – в зависимости от характеристик разряда); в первом приближении можно усреднять $b(\eta)$ для указанного диапазона η ;

ρ_0 – плотность рабочей жидкости, кг/м³;

U_0 – рабочее напряжение в разрядной цепи, В;

C – емкость батареи конденсаторов, Ф;

r – расстояние от канала разряда до объекта штамповки, м;

L – индуктивность разрядной цепи, Гн;

l – длина разрядного промежутка, м.

Расчет, выполненный по формуле (2), показывает, что максимальное давление на фронте ударной волны составит $P_m = 82,8$ МПа.

В разрядных камерах малого объема при расширении парогазовой полости создается импульс давления, который может быть больше давления ударной волны. Расчетное импульсное давление жидкости в разрядной камере малого объема можно определить по формуле [6]:

$$P \approx k \cdot 2,45 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{W_0}{V_{жс}}}, \quad (3)$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий объем жидкости в разрядной камере $V_{жс}$.

Для эксперимента при $V_{жс} = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м³ $k = 0,7$.

При энергии в импульсе $W_0 = 60$ кДж расчетное максимальное импульсное давление в разрядной камере составит $P = 132,8$ МПа.

Как видно из приведенных расчетов, давление на фронте ударной волны более чем в 4 раза, а давление парогазовой полости более чем в 2,5 раза меньше остаточных напряжений сжатия в стенках детали. Это говорит о том, что калибровать деталь необходимо в упругодеформированном состоянии, когда в ней до ЭГ калибровки будут созданы напряжения, близкие к пределу текучести металла.

Все детали парами устанавливали в разъемную матрицу и зажимали ее усилием пресса. При этом деталь упруго деформировалась и принимала форму готовой детали. Затем разжимали матрицу, извлекали детали и проверяли их на отсутствие пластической деформации путем сравнения с исходной формой.

После опытной калибровки первых двух деталей откорректировали процесс по энергии разряда.

Партию деталей калибровали на 3-х режимах с запасаемой энергией ЭГ пресса до 40 кДж. При этом осциллографированием разрядного тока и напряжения следили за процессом ввода энергии в разрядную камеру.

В исследованиях было установлено, что высоковольтный разряд носит характер, близкий к апериодическому, при котором почти вся энергия выделяется в

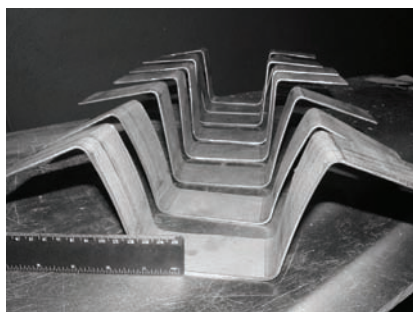
первом периоде разряда, длительность которого не превышает 100 мкс. При таких режимах разряды проходят с высокой эффективностью преобразования электрической энергии в работу пластической деформации.

На 4-х деталях выполнили дополнительно по одному разряду и обобщили результаты этих экспериментов.

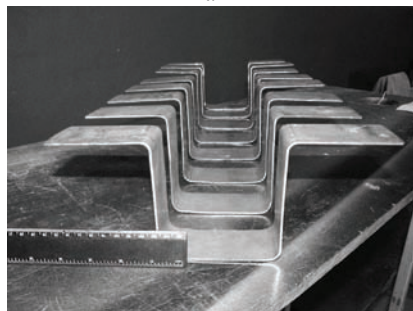
На основании выполненных ранее исследований влияния ЭГ обработки деталей на уменьшение в них уровня остаточных напряжений установили такие определяющие процесс параметры:

- параметры разрядного контура (напряжение, емкость конденсаторной батареи, длина разрядного промежутка);
- расстояние от оси канала разряда до поверхности детали;
- длительность обработки (число разрядов);
- схема нагружения;
- физико-механические свойства материала заготовки.

При осуществлении процесса ЭГ калибровки эти энергетические и технологические параметры являются основными и учитывались в проведенных экспериментах.



а



б

Рис. 4 - Фотографии деталей:
а – до ЭГ калибровки; б – после ЭГ калибровки

Обсуждение результатов исследований.

При установке матрицы с деталями в обойму и прижме штампа прессом вкладыши матрицы плотно прилегали друг к другу и упруго деформировали деталь. Без ЭГ калибровки после разжима штампа и выемки деталей из матрицы пружинение сохранялось для всех деталей. Это говорит о том, что предварительное сжатие деталей в штампе не создавало в них пластической деформации, и последующая ЭГ калибровка выполнялась при упругой деформации деталей.

В процессе ЭГ калибровки каждую деталь на-

гружали одним импульсом, а детали № 6,7,8,9 - двумя импульсами.

Эксперименты показали, что второй импульс практически не изменяет форму детали и может даже привести к появлению «отрицательного» пружинения (пружинения внутрь детали).

На рис. 4, а-б приведены фотографии деталей до и после ЭГ калибровки.

Выводы. Экспериментально подтверждена возможность ЭГ калибровки деталей из высокопрочной стали с устранением пружинения после их деформирования механическим способом.

Исследования проводились на деталях, размеры и форма которых соответствуют общепринятым для испытаний подобного характера. Поэтому их результаты могут быть использованы для технологических процессов, в которых требуется устранение пружинения и стабилизация формы деталей.

Кроме того, необходимо отметить следующее.

1. ЭГ калибровка деталей из высокопрочных сталей должна выполняться с предварительным созданием в ней напряжений, близких к пределу текучести металла.

2. Режимы ЭГ калибровки должны учитывать исходную форму и степень пружинения калибруемой детали – чем выше степень пружинения, тем больше должна быть энергия разряда. В настоящих исследованиях минимальная запасаемая энергия при ЭГ калибровке 1 импульсом составила $W_0 = 28$ кДж, что было достаточно для деталей со средним по величине пружинением. Для деталей с большим пружинением запасаемая энергия была увеличена до 40 кДж.

3. Повторная ЭГ калибровка незначительно изменяет форму детали и может даже привести к появлению «отрицательного» пружинения (пружинения внутрь детали).

4. Для уменьшения энергетических затрат процесса возможна реализация других схем ЭГ калибровки, например, когда деталь устанавливается в матрице с зазором, который позволял бы обеспечить в ней небольшую, до 0,2 %, пластическую деформацию. Это способствовало бы выравниванию в детали деформационных напряжений и уменьшению пружинения. Эффективность ЭГ калибровки может быть увеличена, когда деталь калибруется в многоимпульсном режиме и разряды выполняются непосредственно на деталь. Это возможно в том случае, когда к качеству поверхности детали не предъявляются особые требования.

Такая информация необходима для реализации технологии ЭГ калибровки деталей в промышленных условиях.

Список литературы:

1. Старков Н.В. Импульсная ЭГШ кузовных автомобильных деталей из высокопрочных сталей / Н.В. Старков, Д.Р. Аврамец, С.Ф. Головащенко // ИПМСС Материалы IX Международной научной школы семинара (15-19 августа 2011). – Николаев: 2011. – С. 313-316.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. –

520 с.

3. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0, May 2014. – P. 3-83.

4. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 280 с.

5. Кривицкий Е.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде / Е.В. Кривицкий., В.В. Шамко. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с.

6. Мазуровский Б.Я. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке / Б.Я. Мазуровский, А.Н. Сизев, -Киев: Наук. думка, 1983. 193 с.

7. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы / М.Е. Тараненко. – Х.: Издательский центр «ХАИ», 2011. – 272 с.

References (transliterated):

1. Starkov N.V., Avramets D.R., Golovashchenko S.F. EGSh kuzovnykh avtomobilnykh detaley iz vyisokoprochnykh staley. [Impulse electrohydraulic forming of body automotive parts made of high-strength steels]. IPMSS. Materials of the IX International Scientific School of the Seminar (August 15-19,

2011). Nikolaev, 2011, pp. 313-316.

2. Romanovsky V.P. Spravochnik po holodnoy shtampovke [Reference book on cold forming]. Leningrad, Mashinostroenie, 1979. 520 p.

3. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0, May 2014, pp. 3-83.

4. Popov E.A. Osnovy teorii listovoy shtampovki [Fundamentals of the theory of sheet forming]. Moscow, Mashinostroenie, 1977. 280 p.

5. Krivitsky E.V., Shamko V.V. Perehodnyie protsessy pri vyisokovoltnom razryade v vode [Transient processes in a high-voltage discharge in water]. Kiev, Nauk. dumka, 1979. 208 p.

6. Mazurovsky B.Ya., Sizyov A.N. Elektrogidravlicheskiy effekt v listovoy shtampovke [Electrohydraulic effect in sheet forming]. Kyiv, Nauk. dumka, 1983. 193 p.

7. Taranenko M.E. Elektrogidravlicheskaya shtampovka: teoriya, oborudovanie, tekhpromessy [Electrohydraulic forming: theory, equipment, technical processes]. Kharkov, Izdatelskiy tsentr "KhAI" [Publishing center "KhAI"], 2011. 272 p.

Поступила (received) 06.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Експериментальне дослідження імпульсного електрогидравлічного калібрування листових деталей із високоміцної сталі / М. В. Старков, Л. І. Стрелковська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 79-83. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Экспериментальное исследование импульсной электрогидравлической калибровки листовых деталей из высокопрочной стали / М. В. Старков, Л. И. Стрелковская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 79-83. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Experimental studies of pulse electrohydraulic calibration of sheet parts made of high-strength steel / M. V. Starkov, L. I. Strelkov's'ka // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 79-83. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Старков Микола Володимирович - Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, науковий співробітник; тел.: (067) 850-90-74 e-mail: starkovnikolay@yahoo.com

Старков Николай Владимирович – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, науковий співробітник; тел.: (067) 850-90-74 e-mail: starkovnikolay@yahoo.com

Starkov Mikola Volodymyrovich – Institute of Pulse Processes and Technologies National Academy of Science of Ukraine, Nikolaev, Rsearcher; tel.: (067) 850-90-74 e-mail: starkovnikolay@yahoo.com

Стрелковська Людмила Іванівна – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, провідний конструктор; тел.: (067) 549-89-48 e-mail: igorstrelk@ukr.net

Стрелковська Людмила Іванівна – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, ведучий конструктор; тел.: (067) 549-89-48 e-mail: igorstrelk@ukr.net

Strelkov's'ka Lyudmyla Ivanovna – Institute of Pulse Processes and Technologies National Academy of Science of Ukraine, Nikolaev, Leading Designer; tel.: (067) 549-89-48 e-mail: igorstrelk@ukr.net