

Влияние параметров конической полости разрядной камеры на эффективность электрогидравлической штамповки

В. М. Косенков

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: v.m.kosenkov@gmail.com*

Поступила в редакцию 06.10.2021

После доработки 02.02.2022

Принята к публикации 07.02.2022

Выполнено математическое моделирование процесса электрогидравлической листовой штамповки с использованием разрядных камер с полостью конической формы. Исследовано влияние параметров конической полости разрядной камеры на энергию пластического деформирования пластины и форму ее прогиба. Определено, что высота конуса, малый радиус его верхнего основания и расположение канала разряда вблизи верхнего основания в наибольшей степени увеличивают энергию пластического деформирования пластины.

Ключевые слова: электрический разряд в воде, импульсное деформирование пластин, форма полости разрядной камеры, электрогидравлическая штамповка

УДК 621.7.044.4:621.98

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.3.55>

ВВЕДЕНИЕ

В проведенных ранее исследованиях [1–3] отмечена существенная роль формы полости разрядной камеры на эффективность электрогидравлической штамповки (ЭГШ) листовых металлов.

В работах [2–12] приведены варианты ЭГШ с использованием разрядных камер различной формы: полусферической [6], близкой к конической [7], полусферической, переходящей в цилиндр [8–11], прямоугольной [10, 12]. Наиболее подробное изложение результатов исследования влияния форм разрядных камер на эффективность ЭГШ выполнено в работах [1–3]. В них рассмотрены типовые формы (цилиндрические и конические) разрядных камер, чаще всего применяемых при ЭГШ.

В работе [2] эксперименты проводили при запасаемой энергии 6,7 кДж и максимальном объеме полости камеры 0,56 литра. Авторы утверждают, что при рассмотренных параметрах ЭГШ цилиндрические камеры несколько эффективнее конических. В работе [2] сделан общий вывод, что форма разрядной камеры малого объема оказывает незначительное влияние на процесс вытяжки. Увеличение энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, по отношению к объему разрядной камеры еще больше уменьшает влияние ее формы. Главными факторами, влияющими на ЭГШ, являются объем разрядной камеры, а также расстояние от канала разряда до заготовки.

В работе [3] было проведено экспериментальное исследование равномерности распре-

ления давления на плоскую поверхность в разрядных камерах с параболическо-цилиндрической и коническо-цилиндрической отражающими поверхностями. Эксперименты выполняли при зарядном напряжении 20 кВ, емкости 33,2 мкФ, межэлектродном промежутке 20 мм и расстоянии до многоместных мембранных датчиков давления 110 мм, в качестве которых использовали алюминиевый лист марки АМцМ толщиной 1 мм, помещенный на толстую пластину с множеством отверстий диаметром 6 мм. При этом индуктивность разрядного контура составляла 0,5 мкГн, а запасаемая энергия – 6,6 кДж. Отмечено, что коническо-цилиндрическая разрядная камера показала значительно лучшие результаты по равномерности поля давления на алюминиевый лист.

Также в работе [3] рассмотрено влияние прижимных плит на распределение давления на плоской недеформируемой поверхности. Максимальный объем полости разрядной камеры не превышал 0,8 литра, а запасаемая энергия составляла не более 3,7 кДж. Отмечено, что применение прижимных плит со специально спрофилированной отражающей поверхностью позволяет увеличить воздействие энергосиловых факторов разряда в необходимых областях, что может повысить эффективность формообразования деталей.

В ходе исследования эффективности применения разрядной камеры с параболическо-цилиндрической отражающей поверхностью в работе [3] применяли кольца-концентраторы

конического профиля. На место деформируемой заготовки устанавливали многоместные мембранные датчики давления. Обобщенные (усредненные по серии опытов) результаты экспериментов показали, что при наличии прижимного кольца среднее давление увеличивается в 3 раза (от 18,3 до 56,1 МПа). Минимальное давление возросло в 5,76 раза (от 8,2 до 47,2 МПа), а отличие максимальных и минимальных давлений уменьшилось от 9,68 до 1,43 раза.

В работе [2] рассмотрены разрядные камеры очень малых размеров, поэтому результаты исследований сложно распространить на камеры больших объемов, а в работе [3] изучали только распределение давления по плоской недеформируемой поверхности, поэтому трудно применить полученные результаты для ЭГШ. Результаты исследования влияния формы разрядной камеры на ЭГШ, полученные в работах [2–12], сложно обобщить для практического использования в более широких интервалах геометрических параметров разрядных камер. Эту проблему частично удалось разрешить в работе [1], в которой с помощью математической модели [13] удалось определить влияние некоторых форм полости разрядной камеры на эффективность ЭГШ. Объем полости разрядной камеры варьировали от 2 до 12,9 л. Форму полости камеры задавали в виде кругового цилиндра, ступенчатой цилиндрической формы и усеченного конуса. Было определено, что эффективность ЭГШ выше при использовании разрядных камер с полостью конической формы. Однако параметры конуса не изменяли, а также объем полости разрядной камеры при разной ее форме не был постоянным, что не позволяет их сравнивать по этому параметру, и определяет актуальность выполнения дальнейших исследований.

Цель данной работы – изучить влияние параметров конической полости разрядной камеры на эффективность ЭГШ листовых сталей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Влияние параметров конической полости разрядной камеры на ЭГШ исследовали, используя схему, приведенную на рис. 1. Конусность разрядной камеры характеризовали диаметрами нижнего (D_k) и верхнего (d_k) оснований конической полости 1 высотой h в корпусе разрядной камеры 2. Оси высоковольтного 3 (длиной l_e) и низковольтного 4 электродов, между которыми формировался канал разряда, совпадают с осью камеры 2, что обеспечивает осевую симметрию поля давления и упрощает процесс его анализа, не препятствуя

при этом обобщению полученных результатов.

Полость 1 разрядной камеры с жесткими стенками 2 заполнена водой. Высоковольтный 3 и низковольтный 4 электроды включены в разрядный контур 5, содержащий конденсаторную батарею емкостью C и воздушный разрядник 6. Элементы разрядного контура 5, кроме канала разряда 7, характеризуются активным сопротивлением R_{sh} и индуктивностью L . Конденсаторную батарею заряжали до напряжения U_0 , после которого происходит замыкание цепи через разрядник 6, и напряжение подается на электроды 3 и 4. Под действием напряжения U_0 происходит электрический пробой жидкости между электродами 3 и 4, который инициирует электрический разряд и образование канала разряда 7. Энергия, запасаемая в конденсаторной батарее емкостью C , выделяется в канале 7 и приводит к его расширению в результате повышения в нем давления. Вследствие этого в воде формируются и распространяются ударные волны, которые испытывают дифракцию на стенках разрядной камеры 2, электродах 3 и 4, а также на деформируемой пластине 8, жестко зажатой между прижимным кольцом 9 и открытой кольцевой матрицей 10 внутренним диаметром D_m . В результате взаимодействия образовавшейся системы волн происходят их интерференция и дифракция на деформируемой пластине 8 и канале разряда 7, а впоследствии на парогазовой полости, формируя переменное во времени поле давления в разрядной камере. При таких условиях поле давления в разрядной камере зависит только от конусности полости камеры при постоянном ее объеме, а также от прогиба пластины в процессе ее деформирования под действием волн давления.

Основная задача данной работы состоит в определении влияния параметров конической полости разрядной камеры на энергию пластического деформирования пластины.

В процессе исследования полагали, что внутренний диаметр матрицы D_m и прижимного кольца одинаков и равен 120 мм. Принимали, что расстояние между электродами ($l=30$ мм) и их диаметр ($d_e = 16$ мм) оставались неизменными. Также постоянными оставались параметры разрядного контура. Емкость конденсаторной батареи (C) равна 10 мкФ, индуктивность разрядной цепи (L) – 9,3 мкГн, напряжение заряда батареи (U_0) – 30 кВ, активное сопротивление элементов разрядного контура без канала разряда (R_{sh}) – 0,09 Ом. Учитывали, что инициирование разряда выполняли пробоем слоя воды между электродами после приложения к ним разности потенциалов U_0 . Материал пластины упругопластический с деформационным и

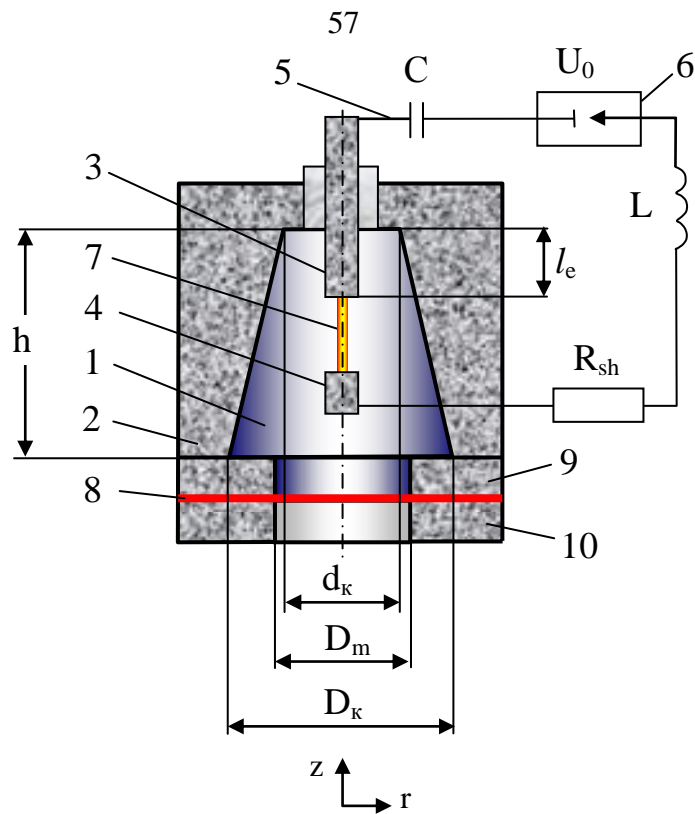


Рис. 1. Схема моделируемой системы: 1 – полость разрядной камеры, заполненная водой; 2 – корпус разрядной камеры; 3 – высоковольтный электрод; 4 – низковольтный электрод; 5 – разрядный контур; 6 – воздушный разрядник; 7 – канал разряда; 8 – деформируемая пластина; 9 – прижимная пластина; 10 – матрица; C – емкость конденсаторной батареи; U_0 – напряжение заряда конденсаторной батареи; L – индуктивность разрядного контура; R_{sh} – сопротивление элементов разрядного контура (без канала разряда).

скоростным упрочнением, имеющий характеристики высокопрочного сплава DP780.

Для исследования использовали математическую модель электрического разряда в воде [14–16], в которой учтены процессы в разрядном контуре, канале разряда и окружающей его жидкости, заполняющей замкнутую разрядную камеру осесимметричной формы, а также деформирование пластины под действием волн давления в разрядной камере. Сравнение результатов, полученных по математической модели [14–16], с данными экспериментов [17, 18] показало их удовлетворительное согласование, что свидетельствует об адекватности математической модели [14–16] физическим явлениям, происходящим при электрическом разряде в воде, и возможности ее использования для решения задачи, поставленной в данной работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование влияния параметров конической полости разрядной камеры на ЭГШ выполняли для камер двух объемов ее полости (V) 1,36 л и 2,72 л, которые оставались постоянными в процессе изменения конусности. Диаметр нижнего основания конуса D_k изменяли от 120 до 200 мм, тогда диаметр верхнего основания конуса d_k изменялся от 120 до 16 мм по условию постоянства V. Высоту конуса принимали равной 120 и 240 мм.

Результаты математического моделирования свидетельствуют, что уменьшение радиуса верхнего основания конуса (r_k) приводит к монотонному увеличению энергии пластического деформирования пластины (E_p) (рис. 2). Величина E_p наименьшая, когда $r_k = D_k/2$, то есть полость разрядной камеры имеет форму цилиндра. Увеличение высоты конической полости h от 120 до 240 мм приводит к уменьшению E_p до 5%. В большей степени на величину E_p влияет изменение положения канала разряда по высоте конуса за счет изменения длины высоковольтного электрода l_e . Когда $h = 120$ мм, перемещение канала разряда из среднего положения по высоте конуса приблизительно на $h/4$ от верхнего основания за счет изменения l_e от 45 до 20 мм приводит к увеличению E_p до 13% при $r_k = 8$ мм. При большей высоте конуса ($h = 240$ мм) подобные изменения положения канала разряда, когда l_e уменьшается от 105 до 45 мм, приводят к увеличению E_p до 21% при $r_k = 8$ мм. При этом для цилиндрической полости положение канала разряда на величину E_p практически не влияет. Увеличение высоты конуса от 120 до 240 мм увеличивает E_p при $r_k = 8$ мм в еще большей степени (рис. 3).

В отличие от E_p объем пластического прогиба пластины V_p увеличивается немонотонно в процессе уменьшения r_k (рис. 4 и 5) и при некоторых величинах r_k принимает значения даже

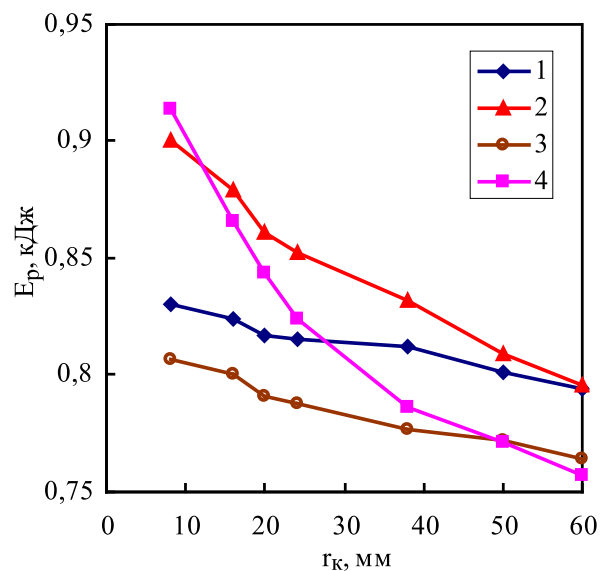


Рис. 2. Зависимость энергии пластической деформации пластины от радиуса верхнего основания конуса: 1 – $h = 120$ мм, $l_e = 45$ мм; 2 – $h = 120$ мм, $l_e = 20$ мм; 3 – $h = 240$ мм, $l_e = 105$ мм; 4 – $h = 240$ мм, $l_e = 45$ мм.

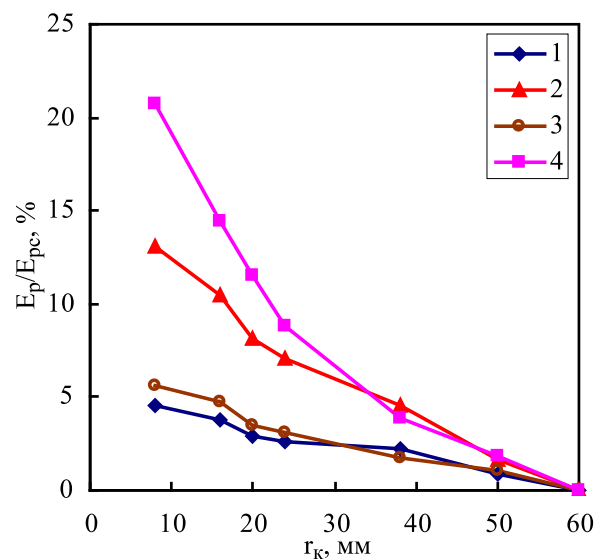


Рис. 3. Энергия пластического деформирования пластины в конической камере по отношению к энергии деформирования пластины в цилиндрической камере: 1 – $h = 120$ мм, $l_e = 45$ мм; 2 – $h = 120$ мм, $l_e = 20$ мм; 3 – $h = 240$ мм, $l_e = 105$ мм; 4 – $h = 240$ мм, $l_e = 45$ мм.

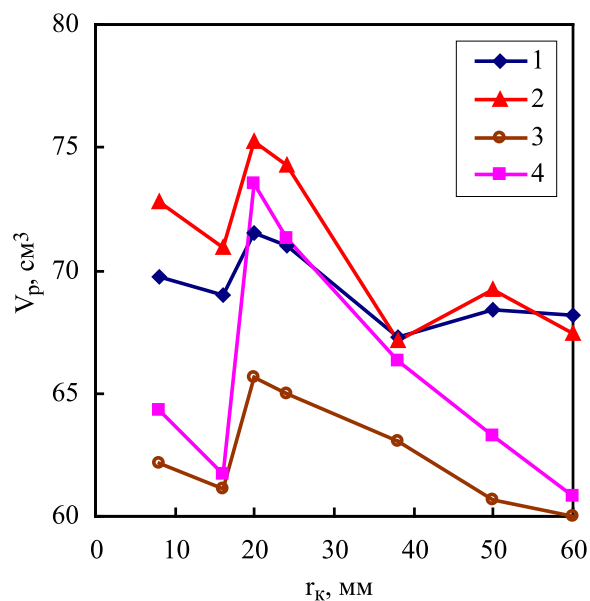


Рис. 4. Зависимость объема пластического прогиба пластины от радиуса верхнего основания конуса: 1 – $h = 120$ мм, $l_e = 45$ мм; 2 – $h = 120$ мм, $l_e = 20$ мм; 3 – $h = 240$ мм, $l_e = 105$ мм; 4 – $h = 240$ мм, $l_e = 45$ мм.

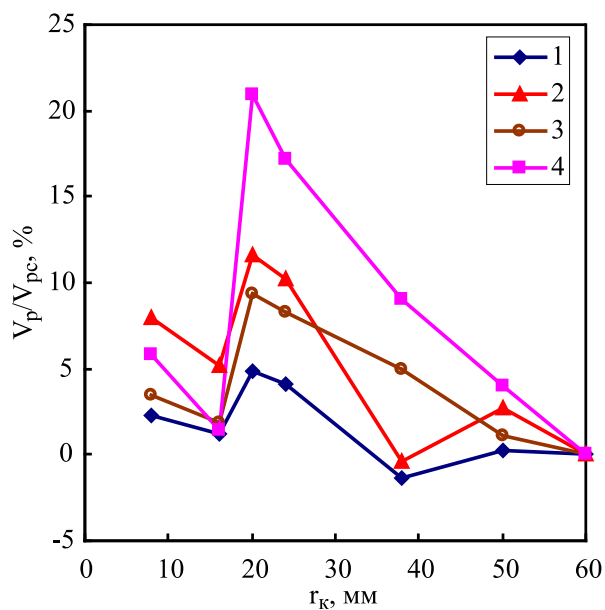


Рис. 5. Объем пластического прогиба пластины в конической камере по отношению к объему пластического прогиба пластины в цилиндрической камере: 1 – $h = 120$ мм, $l_e = 45$ мм; 2 – $h = 120$ мм, $l_e = 20$ мм; 3 – $h = 240$ мм, $l_e = 105$ мм; 4 – $h = 240$ мм, $l_e = 45$ мм.

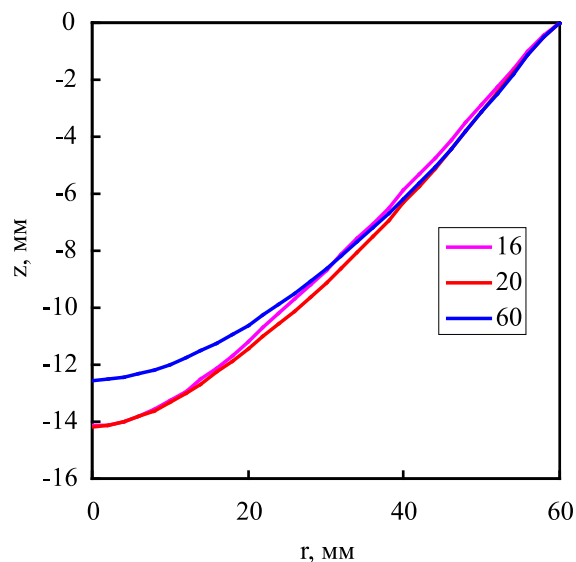


Рис. 6. Форма прогиба пластины в диаметральной плоскости ($h = 120$ мм, $l_e = 45$ мм) при указанных радиусах верхнего основания конуса: 16, 20 и 60 мм.

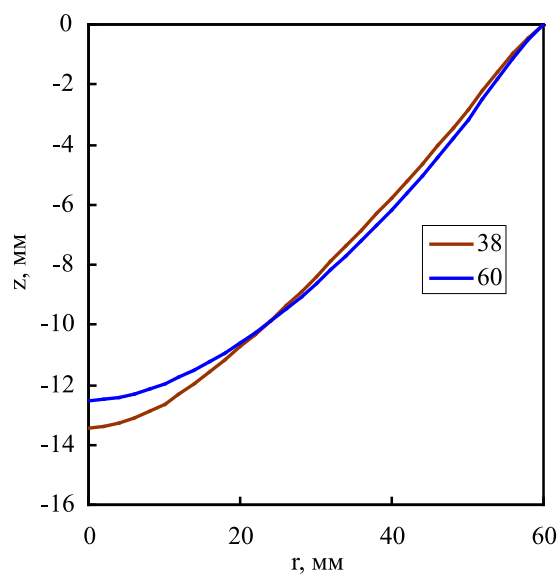


Рис. 7. Форма прогиба пластины в диаметральной плоскости ($h = 120$ мм, $l_e = 45$ мм) при указанных радиусах верхнего основания конуса: 38 и 60 мм.

меньшие по сравнению с объемом прогиба пластины V_{pc} , получаемым при использовании цилиндрической полости (рис. 4 и 5, линии 1 и 2). Причина такого изменения V_p состоит в существенном влиянии параметров конической полости разрядной камеры на распределение давления на поверхности деформируемой пластины, в результате которого ее форма существенно изменяется (рис. 6 и 7). Так, при $h = 120$ мм и $l_e = 45$ мм линия профиля пластины, полученная когда $r_k = 20$ мм, имеет большие величины прогиба по сравнению с профилем, полученным при $r_k = 60$ мм (в цилиндрической полости), тогда как при $r_k = 16$ мм при больших r прогиб меньше, несмотря на большой прогиб в центре пластины (рис. 6), что приводит к меньшим величинам V_p . Подобным образом соотносятся профили прогиба пластины при $r_k = 38$ и 60 мм (рис. 7).

ВЫВОДЫ

Из проведенного исследования следует, что изменение параметров конической полости разрядной камеры существенно влияет на профиль прогиба пластины. Зависимости объема прогиба от радиуса верхнего основания имеют максимум, но при этом энергия пластического деформирования пластины убывает с ростом радиуса. Положение канала по высоте конической полости существенно влияет на процесс деформирования пластины. Относительное увеличение высоты конуса при смещении канала разряда к верхнему основанию существенно увеличивает энергию пластического деформирования пластины при малых радиусах верхнего основания конической полости.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kosenkov, V.M. and Bychkov, V.M., Influence of some axially symmetric stepped forms of discharge chambers on the efficiency of electrohydraulic forming, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 1, p. 89. doi: 10.3103/S1068375519010113.
2. Чачин, В.Н., Шадуя, В.Л., Журавский, А.Ю., Здор, Г.Н., *Электрогидроимпульсное формообразование с использованием замкнутых камер*, Минск: Наука и техника, 1985. 200 с.
3. Жовноватюк, Я.С., Пути стабилизации и интенсификации полей нагружения ударными волнами при электрогидроимпульсной штамповке за счет конструктивных решений, *Авиационно-космическая техника и технология*, 2011, т. 85, № 8, с. 15.
4. Мазуровский, Б.Я., Сизев, А.Н., *Электрогидравлический эффект в листовой штамповке*, Киев: Наукова думка, 1983. 192 с.
5. Чачин, В.Н., Богоявленский, К.Н., Вагин, В.А., *Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении*, Минск: Наука и техника, 1987. 231 с.
6. Rohatgi, A., Stephens, E.V., Davies, R.W., Smith, M.T., et al., Electro-hydraulic forming of sheet metals: Free-forming vs. conical-die forming, *J. Mater. Process. Technol.*, 2012, vol. 212, no. 5, p. 1070. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.12.014.
7. Hassennejadasl, A., Daniel, E.G., Golovashchenko, S.F., Javad, S., et al., Numerical modelling of electrohydraulic free-forming and die-forming of DP590 steel, *J. Manuf. Process.*, 2014, vol. 16, no. 3, p. 391. doi: 10.1016/j.jmapro.2014.04.004.
8. Mamutov, V., Golovashchenko, S. and Mamutov, A., Simulation of high-voltage discharge channel in water at electro-hydraulic forming using LS-DYNA, *Proc. 13th Int. LS-DYNA Conf.*, June 8–14, 2014, Detroit, USA, 2014, p. 1.
9. Hassennejadasl, A., Simulation of electrohydraulic forming using anisotropic, rate-dependent plasticity models, *PhD Thesis*, Windsor: Univ. of Windsor, 2014.
10. Gillard, A.J., Golovashchenko, S.F. and Mamutov, A.V., Effect of quasi-static prestrain on the formability of dual phase steels in electrohydraulic forming, *J. Manuf. Process.*, 2013, vol. 15, no. 2, p. 201. doi: 10.1016/j.jmapro.2012.12.005.
11. Golovashchenko, S.F., Gillard, A.J. and Mamutov, A.V., Formability of dual phase steels in electrohydraulic forming, *J. Mater. Process. Technol.*, 2013, vol. 213, № 7, p. 1191. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.026.
12. Golovashchenko, S.F., Gillard, A.J., Mamutov, A.V., Bonnen, J.F., et al., Electrohydraulic trimming of advanced and ultra high strength steels, *J. Mater. Process. Technol.*, 2014, vol. 214, no. 4, p. 1027. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.09.003.
13. Kosenkov, V.M. and Kuz'menko, V.G., Measurement of plate deflection during electrohydraulic deformation, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2016, vol. 52, no. 5, p. 487. doi: 10.3103/S1068375516050070.
14. Косенков, В.М., Влияние парогозовой полости на поле давления в замкнутой разрядной камере с деформируемой стенкой, *ЭОМ*, 2021, № 3, с. 102. doi.org/10.52577/eom.2021.57.3.
15. Shcherba, A.A., Kosenkov, V.M. and Bychkov, V.M., Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2015, vol. 51, no. 6, p. 581. doi: 10.3103/S1068375515060113.
16. Косенков, В.М., Влияние парогозовой полости на поле давления в замкнутой разрядной камере с жесткими стенками, *ЭОМ*, 2020, № 3–4, с. 42. doi.org/10.5281/zenodo.3970429

17. Косенков, В.М., Бычков, В.М., Влияние индуктивности электрической цепи на энергетические характеристики разряда в воде и деформирования пластин, *Письма в ЖТФ*, 2017, т. 43, № 16, с. 102. doi: 10.21883/PJTF.2017.16.44939.16706
18. Наугольных, К.А., Рой, Н.А., *Электрические разряды в воде*, М.: Наука, 1971. 155 с.

Summary

Mathematical modeling of the electrohydraulic sheet metal stamping process using discharge chambers with a

conical cavity was carried out. The influence of the parameters of the conical cavity of the discharge chamber on the plastic deformation energy of the plate and the shape of its deflection was investigated. It was determined that the height of the cone, a small radius of its upper base, and the location of the discharge channel near the upper base increase the plastic deformation energy of the plate to the greatest extent.

Keywords: electric discharge in water, impulse deformation of plates, shape of the discharge chamber cavity, electrohydraulic stamping