

Влияние параметров прижимной пластины на эффективность электрогидравлического деформирования жестко заземленной заготовки

В. М. Косенков

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

Поступила в редакцию 31.08.2022

После доработки 05.06.2023

Принята к публикации 12.06.2023

На основе математического моделирования процесса электрогидравлической листовой штамповки исследовано влияние прижимной пластины на деформирование заготовки, жестко заземленной по ее внешнему контуру. Установлено влияние: толщины прижимной пластины и ее внутреннего диаметра, по отношению к диаметру полости цилиндрической разрядной камеры, на энергию пластического деформирования заготовки и форму ее прогиба; параметров прижимной пластины на давление гидродинамических волн на заготовку, форму ее прогиба и эффективность использования энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, для пластического деформирования заготовки.

Ключевые слова: электрический разряд в воде, импульсное деформирование листовой заготовки, прижимная пластина, электрогидравлическая штамповка

УДК 621.7.044.4:621.98

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.4.65>

ВВЕДЕНИЕ

На эффективность электрогидравлической штамповки (ЭГШ) листовых металлов влияют многие конструктивные элементы разрядной камеры и штампов [1–15]. Влияние параметров разрядной цепи [1, 2], объема разрядной камеры [3, 4], ее формы [5–7], типа матрицы [8–15] на ЭГШ исследовали в ряде работ, однако влиянию прижимной пластины на ЭГШ уделено недостаточно внимания. По-видимому, только в работе [7] приведена наиболее полная информация о существенном влиянии прижимной пластины на поле давления, действующее на лист металла, лежащий на плите с малыми отверстиями, однако процесс ЭГШ в целом не рассматривали, что определяет актуальность дальнейшего исследования.

Цель данной работы – изучить влияние параметров прижимной пластины на эффективность процесса ЭГШ листовой заготовки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Влияние параметров прижимной пластины на ЭГШ исследовали, используя схему, приведенную на рис. 1. Цилиндрическую полость 1 в корпусе разрядной камеры 2 характеризовали диаметром (D_k) и высотой (h). 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 заземленной между прижимной пластиной 9 и

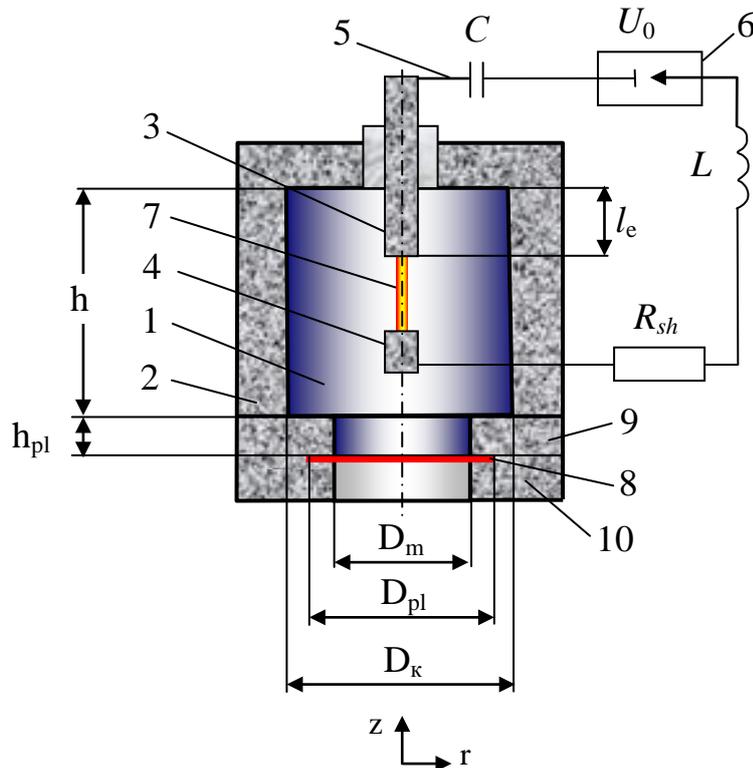


Рис. 1. Схема моделируемой системы: 1 – полость разрядной камеры, заполненная водой; 2 – корпус разрядной камеры; 3 – высоковольтный электрод; 4 – низковольтный электрод; 5 – разрядный контур; 6 – воздушный разрядник; 7 – канал разряда; 8 – деформируемая пластина (заготовка); 9 – прижимная пластина; 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).

открытой кольцевой матрицей 10 внутренним диаметром D_m . Внутренний диаметр прижимной пластины толщиной h_{pl} принимали равным диаметру матрицы D_m . В результате взаимодействия образовавшейся системы волн происходят их интерференция и дифракция на деформируемой пластине 8, прижимной пластине 9 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 от параметров D_m и h_{pl} , а также от прогиба пластины в процессе ее деформации под действием волн давления.

Основная задача данной работы состоит в определении влияния параметров прижимной пластины D_m и h_{pl} на энергию пластического деформирования плоской заготовки.

В процессе исследования полагали, что $h = 120$ мм, а D_k и D_m варьировали от 60 до 120 мм. 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 заготовки, толщиной 1,4 мм и диаметром $D_m + 12$ мм, упругопластический с деформационным и скоростным упрочнением, имеющий характеристики высокопрочного сплава DP780. Заготовка жестко закреплена по ее внешнему контуру.

Для исследования использовали математическую модель электрического разряда в воде [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 [16], с данными экспериментов [1, 2] показало их удовлетворительное согласование, что свидетельствует об адекватности математической модели [16] физическим явлениям, происходящим при электрическом разряде в воде, и возможности ее использования для решения задачи, поставленной в данной работе.

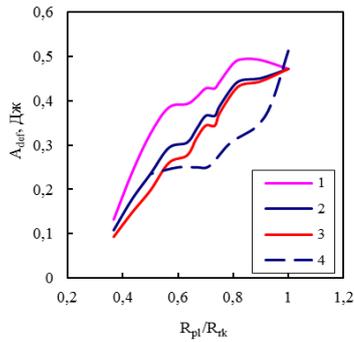


Рис. 2. Зависимость энергии пластического деформирования заготовки от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 – $h_{pl} = 0$, $D_k = 120$ мм; 2 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм; 3 – $h_{pl} = 20$ мм, $D_k = 120$ мм; 4 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_m = 60$ мм.

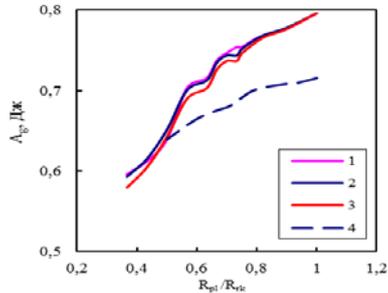


Рис. 4. Зависимость гидродинамической энергии расширения канала разряда от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 – $h_{pl} = 0$, $D_k = 120$ мм; 2 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм; 3 – $h_{pl} = 20$ мм, $D_k = 120$ мм; 4 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_m = 60$ мм.

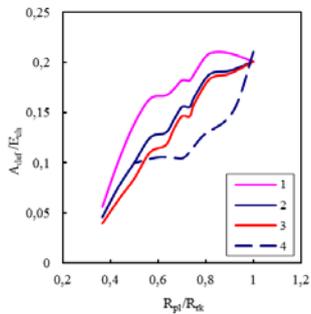


Рис. 6. Зависимость энергии пластического деформирования заготовки по отношению к энергии канала разряда от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 – $h_{pl} = 0$, $D_k = 120$ мм; 2 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм; 3 – $h_{pl} = 20$ мм, $D_k = 120$ мм; 4 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_m = 60$ мм.

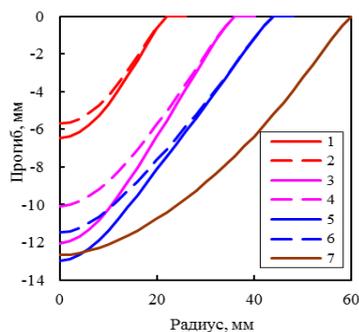


Рис. 8. Форма прогиба заготовки в диаметальной плоскости ($D_k = 60$ мм). Сплошные линии – $h_{pl} = 0$ мм, а штриховые – $h_{pl} = 10$ мм. 1 и 2 – $D_m = 44$ мм; 3 и 4 – $D_m = 68$ мм; 5 и 6 – $D_m = 84$ мм; 7 – $D_m = D_k$.

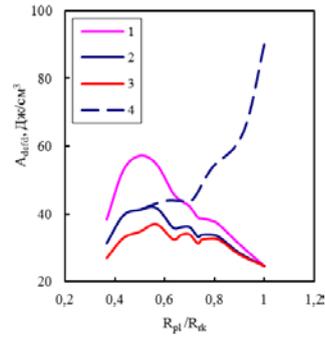


Рис. 3. Зависимость плотности энергии пластического деформирования заготовки от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 – $h_{pl} = 0$, $D_k = 120$ мм; 2 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм; 3 – $h_{pl} = 20$ мм, $D_k = 120$ мм; 4 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_m = 60$ мм.

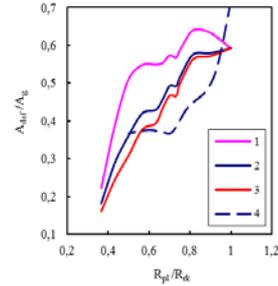


Рис. 5. Зависимость энергии пластического деформирования заготовки по отношению к гидродинамической энергии расширения канала разряда от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 – $h_{pl} = 0$, $D_k = 120$ мм; 2 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм; 3 – $h_{pl} = 20$ мм, $D_k = 120$ мм; 4 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_m = 60$ мм.

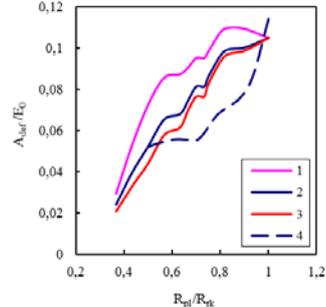


Рис. 7. Зависимость энергии пластического деформирования заготовки по отношению к энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 – $h_{pl} = 0$, $D_k = 120$ мм; 2 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм; 3 – $h_{pl} = 20$ мм, $D_k = 120$ мм; 4 – $h_{pl} = 10$ мм, $D_m = 60$ мм.

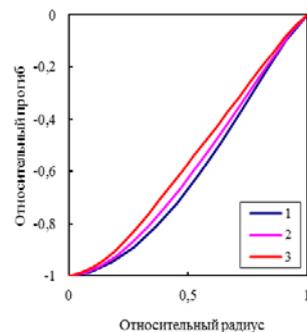


Рис. 9. Форма прогиба заготовки в диаметальной плоскости ($h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм). 1 – $D_m = 44$ мм; 2 – $D_m = 60$ мм; 3 – $D_m = 80$ мм.

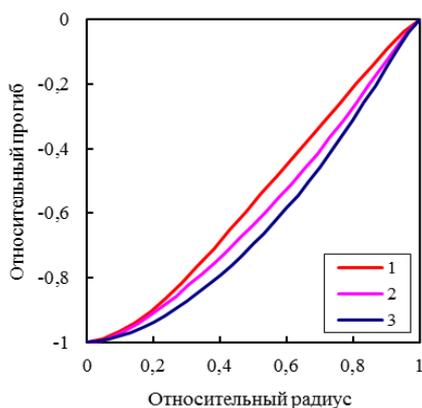


Рис. 10. Форма прогиба заготовки в диаметральной плоскости ($h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм). 1 – $D_m = 80$ мм; 2 – $D_m = 100$ мм; 3 – $D_m = D_k$.

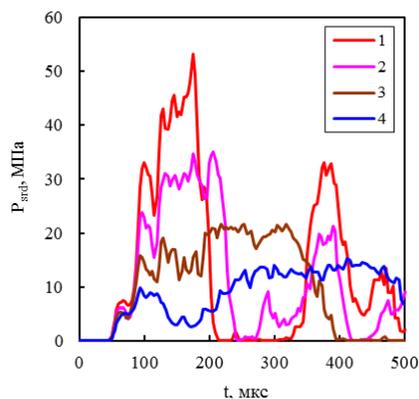


Рис. 11. Среднее давление гидродинамических волн на заготовку ($h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм). 1 – $D_m = 44$ мм; 2 – $D_m = 60$ мм; 3 – $D_m = 80$ мм; 4 – $D_m = D_k$.

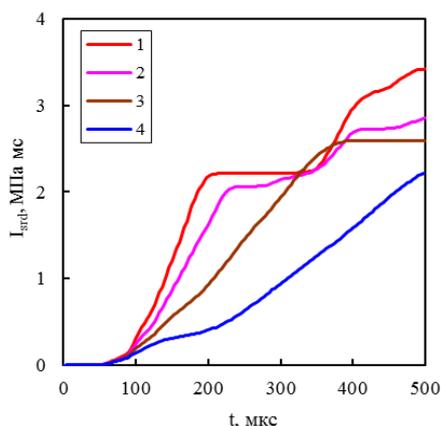


Рис. 12. Средний импульс давления гидродинамических волн на заготовку ($h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм). 1 – $D_m = 44$ мм; 2 – $D_m = 60$ мм; 3 – $D_m = 80$ мм; 4 – $D_m = D_k$.

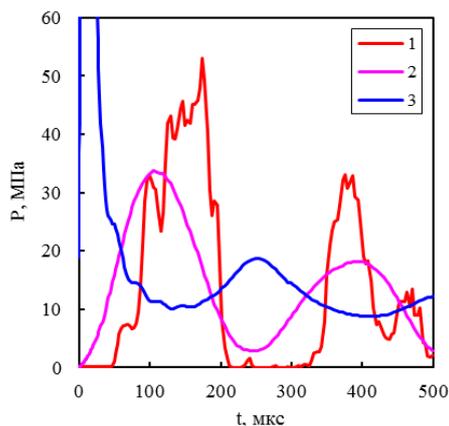


Рис. 13. Сравнение среднего давления гидродинамических волн на заготовку 1 ($h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм, $D_m = 44$ мм) со средним давлением в разрядной камере 2 и давлением в канале разряда 3.

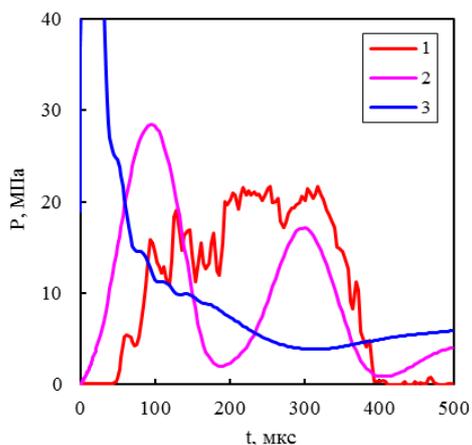


Рис. 14. Сравнение среднего давления гидродинамических волн на заготовку 1 ($h_{pl} = 10$ мм, $D_k = 120$ мм, $D_m = 80$ мм) со средним давлением в разрядной камере 2 и давлением в канале разряда 3.

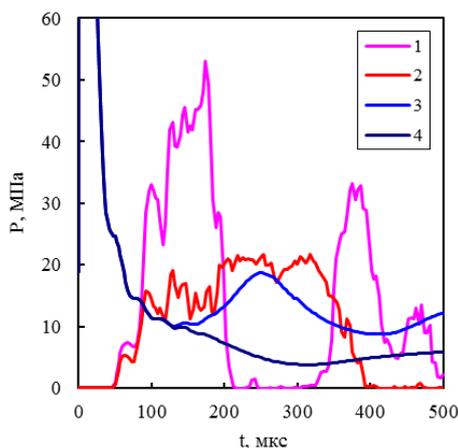


Рис. 15. Сравнение среднего давления гидродинамических волн на заготовку 1 ($D_m = 44$ мм) и 2 ($D_m = 80$ мм) с давлением в канале разряда 3 ($D_m = 44$ мм) и 4 ($D_m = 80$ мм). $h_{pl} = 10$ мм; $D_k = 120$ мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование влияния параметров прижимной пластины на характеристики процесса деформирования заготовки наиболее наглядно можно представить в зависимости от относительного радиуса прижимной пластины

R_{pl}/R_{rk} ($R_{pl} = D_m/2$, $R_{rk} = D_k/2$) при прочих фиксированных параметрах.

Увеличение относительного радиуса R_{pl}/R_{rk} от 0,35 до 1 при $D_k = 120$ мм приводит к пятикратному увеличению энергии пластического деформирования заготовки (A_{def}) (рис. 2). Изменение A_{def} существенно зависит от

h_{pl} . В наибольшей степени влияние h_{pl} проявляется при его значениях, близких к нулю (рис. 2, линия 1), когда увеличение R_{pl}/R_{rk} от 0,35 до 0,55 приводит к изменению A_{def} в 4 раза, а увеличение R_{pl}/R_{rk} от 0,55 до 1 повышает A_{def} только на 20%. Увеличение h_{pl} до 10 мм и 20 мм приводит к зависимости A_{def} от R_{pl}/R_{rk} , которая близка к линейной (рис. 2, линии 2 и 3). При $D_m = 60$ мм изменение R_{pl}/R_{rk} происходит за счет изменения D_k . В таком случае зависимость A_{def} от R_{pl}/R_{rk} приобретает вид, показанный на рис. 2 (линия 4). Увеличение D_k приводит к уменьшению A_{def} в 2 раза.

Зависимости плотности энергии деформирования заготовки (A_{defd}) от R_{pl}/R_{rk} при фиксированных D_k и D_m радикально отличаются (рис. 3). При постоянном $D_k = 120$ мм зависимость A_{defd} от R_{pl}/R_{rk} имеет максимум вблизи $R_{pl}/R_{rk} = 0,5$, а при постоянном $D_m = 60$ мм экстремума нет и A_{defd} больше до 2 раз по сравнению с постоянным $D_k = 120$ мм. В первом случае экстремум в зависимости A_{defd} от R_{pl}/R_{rk} возникает за счет увеличения объема заготовки с увеличением D_m при малом изменении плотности энергии в разрядной камере, а во втором случае A_{defd} увеличивается за счет повышения плотности энергии в разрядной камере при уменьшении D_k . Уменьшение h_{pl} от 20 мм до 0 дает увеличение A_{defd} до 1,5 раза.

Гидродинамическая энергия расширения канала разряда (A_g) существенно зависит от R_{pl}/R_{rk} (рис. 4). Изменение R_{pl}/R_{rk} от 0,35 до 1 приводит к увеличению объема прогиба заготовки, что обеспечивает больший объем расширения канала разряда и, соответственно, увеличение A_g на 30%, если $D_k = 120$ мм, и на 20%, когда $D_m = 60$ мм. Величина A_g в малой степени зависит от h_{pl} при фиксированном соотношении R_{pl}/R_{rk} (рис. 4). Изменение R_{pl}/R_{rk} от 0,35 до 1 увеличивает часть энергии A_g , используемой для A_{def} от 15 до 70% (рис. 5), и в этом случае величина h_{pl} существенно влияет на A_{def}/A_g , уменьшая это соотношение до 1,5 раза при увеличении h_{pl} от 0 до 20 мм. При этом A_{def} составляет от 4 до 22% от энергии, выделившейся в канале разряда (E_{ch}) (рис. 6) и от 2 до 11% по отношению к энергии, запасаемой в конденсаторной батарее (E_0) (рис. 7).

Толщина прижимной пластины h_{pl} влияет на величину прогиба заготовки и в малой степени изменяет ее форму (рис. 8). Уменьшение h_{pl} от 10 до 0 мм увеличивает прогиб заготовки вблизи ее полюса до 20%, что приводит к увеличению A_{def} .

Изменение D_m влияет на величину прогиба заготовки (рис. 8) и ее форму (рис. 9, 10). С увеличением D_m возрастает прогиб заготовки и объем ее прогиба (рис. 8). Форма прогиба

заготовки при изменении D_m от 44 до 80 мм приобретает более заостренный профиль (рис. 9), а изменение D_m от 80 до 120 мм приводит к более пологому профилю (рис. 10).

Прогиб заготовки и давление гидродинамических волн на ее поверхность взаимозависимы. Увеличение скорости прогиба заготовки приводит к уменьшению давления жидкости на ее поверхность. Изменение D_m прижимной пластины также влияет на давление жидкости на заготовку, так как изменяет форму и площадь жестких поверхностей разрядной камеры (рис. 11). Когда D_m намного меньше, чем D_k , тогда среднее давление на поверхность заготовки состоит из серии импульсов, в промежутке между которыми возникает кавитация воды, при которой давление на заготовку уменьшается до давления насыщенного пара (практически до нуля) (рис. 11, линии 1 и 2). Увеличение D_m повышает длительность давления на заготовку и уменьшает амплитуду давления. При этом средний импульс давления гидродинамических волн на заготовку возрастает медленнее (рис. 12).

Когда D_m намного меньше, чем D_k , тогда среднее давление гидродинамических волн на заготовку согласовано по фазе со средним давлением в разрядной камере и в противофазе с давлением в канале разряда (рис. 13), так как площадь поверхности заготовки намного меньше, чем площадь дна поверхности разрядной камеры. При увеличении D_m согласование среднего давления на заготовку со средним давлением жидкости в разрядной камере нарушается (рис. 14) вследствие увеличения влияния движения заготовки на гидродинамические процессы в разрядной камере. Среднее давление гидродинамических волн на заготовку согласуется в противофазе с давлением в канале разряда независимо от величины D_m (рис. 15).

ВЫВОДЫ

Из проведенного исследования следует, что изменение параметров прижимной пластины D_m и h_{pl} (при фиксированных остальных параметрах исследуемой системы) существенно влияет на энергию пластического деформирования плоской заготовки и на профиль ее прогиба. Чем ближе D_m к D_k и меньше h_{pl} , тем больше энергия пластического деформирования заготовки и эффективность использования энергии, запасаемой в конденсаторной батарее. Увеличение R_{pl}/R_{rk} от 0,35 до 1 при $D_k = 120$ мм приводит к пятикратному увеличению A_{def} . Увеличение D_k от 60 до 120 мм при $D_m = 60$ мм приводит к уменьшению A_{def} в 2 раза.

В наибольшей степени влияние h_{pl} на A_{def} проявляется при его значениях, близких к нулю, когда увеличение R_{pl}/R_{rk} от 0,35 до 0,55 приводит к изменению A_{def} в 4 раза, а увеличение R_{pl}/R_{rk} от 0,55 до 1 повышает A_{def} только на 20%. Увеличение R_{pl}/R_{rk} от 0,35 до 1 вызывает увеличение эффективности использования гидродинамической энергии расширения канала разряда и парогазовой полости в 3 раза, энергии, выделившейся в канале разряда, – в 4 раза и энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, – в 5 раз.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наугольных, К.А., Рой, Н.А., *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 155 с.
2. 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
3. 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.
4. Косенков, В.М., Влияние объема цилиндрической разрядной камеры с жесткими стенками на поле давления в заполняющей ее воде, *ЭОМ*, 2022, № 2, с. 68. <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.2.68>
5. Чачин, В.Н., Богоявленский, К.Н., Вагин, В.А., *Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении*. Минск: Наука и техника, 1987. 231 с.
6. Косенков, В.М., Влияние параметров конической полости разрядной камеры на эффективность электрогидравлической штамповки, *ЭОМ*, 2022, № 3, с. 55. <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.3.55>
7. Жовноватюк, Я.С., Пути стабилизации и интенсификации полей нагружения ударными волнами при электрогидроимпульсной штамповке за счет конструктивных решений, *Авиационно-космич. техн. технол.*, 2011, т. 85, № 8, с. 15.
8. Мазуровский, Б.Я., Сизев, А.Н., *Электрогидравлический эффект в листовой штамповке*. Киев: Наукова думка, 1983. 192 с.
9. Mamutov, A.V., Golovashchenko, S.F., Bessonov, N.M. and Mamutov, V.S., Electrohydraulic forming of low volume and prototype parts: Process design and practical examples, *J. Manufact. Mater. Proces.*, 2021, vol. 5, no. 47. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020047>
10. Cheng, J., Green, D.E. and Golovashchenko, S.F., Formability enhancement of DP600 steel sheets in electro-hydraulic die forming, *J. Mater. Proces. Technol.*, 2017, vol. 244, p. 178.
11. Mamutov, A.V., Golovashchenko, S.F., Mamutov, V.S. and Bonnen, J.J.F., Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts, *J. Mater. Proces. Technol.*, 2015, vol. 219, p. 84.
12. Hassannejadasl, 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.
13. 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, № 2, p. 201. doi: 10.1016/j.jmapro.2012.12.005.
14. 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. Proces. Technol.*, 2014, vol. 214, no. 4, p. 1027. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.09.003.
15. Косенков, В.М., Влияние способа деформирования листовых алюминиевых сплавов на увеличение пластических деформаций, *Письма о материалах*, 2014, т. 4, № 1, с. 18. doi: 10.22226/2410-3535-2014-1-18-21.
16. Kosenkov, V.M., Gas-vapor cavity effect on pressure field in deformable wall closed discharge chamber, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2022, vol. 58, p. 63. doi: 10.3103/s1068375522010057

Summary

On the base of the mathematical modeling of the process of electro-hydraulic sheet forging, a study was made of the influence of the pressure plate on the deformation of a rigidly clamped workpiece. The influence of the thickness of the pressure plate and its inner diameter, in relation to the diameter of the cavity of the cylindrical discharge chamber, on the energy of the plastic deformation of the workpiece and the shape of its deflection was studied. The significant influence of the parameters of the pressure plate on the pressure of hydrodynamic waves on the workpiece, the shape of its deflection and the efficiency of using the energy stored in the capacitor bank for plastic deformation of the workpiece were determined.

Keywords: electric discharge in water, pulse deformation of a sheet blank, pressure plate, electro-hydraulic stamping