

# Влияние некоторых осесимметричных ступенчатых форм разрядных камер на эффективность электрогидравлической штамповки

\* В. М. Косенков, В. М. Бычков

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

Выполнено математическое моделирование процесса электрогидравлической штамповки с использованием схем ступенчатых осесимметричных разрядных камер. Тестирование математической модели проведено на основе экспериментальных данных с использованием оптического метода измерения прогиба пластины. Показано, что изменение формы разрядной камеры может значительно влиять на эффективность электрогидравлической штамповки при равных параметрах разрядного контура. Определено, что наибольшую эффективность штамповки обеспечивает разрядная камера конической формы.

*Ключевые слова:* электрический разряд в воде, импульсное деформирование пластин, разрядная камера, электрогидравлическая штамповка.

УДК 621.7.044.4:621.98

DOI: 10.5281/zenodo.1168349

## ВВЕДЕНИЕ

Прочность сплавов, которые используют в автомобильной и других отраслях промышленности, постоянно возрастает, поэтому их штамповка традиционными методами становится неэффективной. Как показывают исследования отечественных и зарубежных авторов, электрогидравлическая штамповка (ЭГШ) имеет широкие перспективы применения для изготовления деталей из листовых высокопрочных сплавов.

Одним из факторов, который влияет на эффективность преобразования энергии при ЭГШ, является форма разрядной камеры [1–3]. Для исследования влияния ее формы на процесс электрогидравлической штамповки широко применяются экспериментальные исследования на лабораторных стендах, при этом значительная часть времени сопряжена с постоянной их перенастройкой, изготовлением образцов и частей оснастки.

При изучении влияния формы разрядной камеры более целесообразно применение математического моделирования, что позволит не изготавливать множество разрядных камер различной формы, а использовать лишь несколько вариантов при тестировании модели. Математическая модель, использованная для данной работы, описана в [1]. Применение более рациональных форм разрядных камер при проектировании оснастки позволит повысить эффективность ЭГШ, поэтому изучение влияния форм

разрядной камеры на ЭГШ является важной прикладной задачей.

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 [2, 3]. В них рассмотрены типовые формы (цилиндрические и конические) разрядных камер, чаще всего применяемых при ЭГШ, которые просто и доступно изготовить практически всеми видами металлорежущего оборудования.

В работе [2] эксперименты проводили для следующих параметров разрядного контура: емкость конденсаторной батареи 1027 мкФ, напряжение 3,6 кВ, что соответствует запасаемой энергии 6,7 кДж. На рис. 1 приведена схема разрядной камеры. Максимальный объем полости камеры не превышал 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 и расстояние от канала разряда до заготовки.

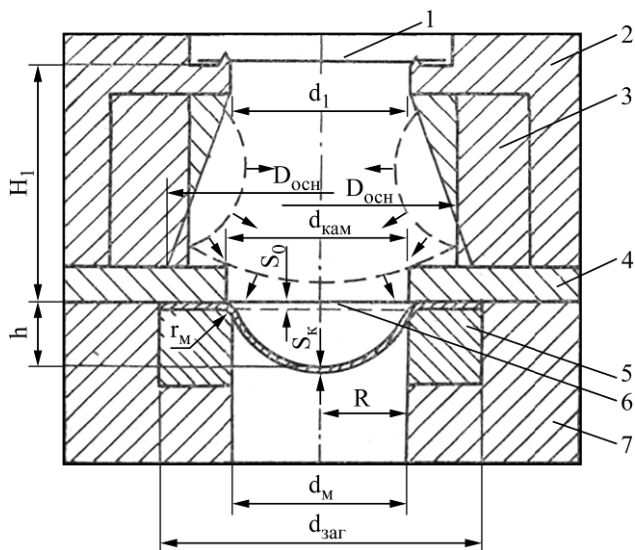


Рис. 1. Схема сборки универсальной оснастки [2]. 1 – взрывающаяся проволочка; 2 – разрядная камера; 3 – сменная вставка; 4 – прижимное кольцо; 5 – вытяжное сменное кольцо; 6 – заготовка; 7 – основание матрицы.

В работе [3] было проведено экспериментальное исследование равномерности распределения 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 формования 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. Схемы экспериментов представлены на рис. 2. 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.

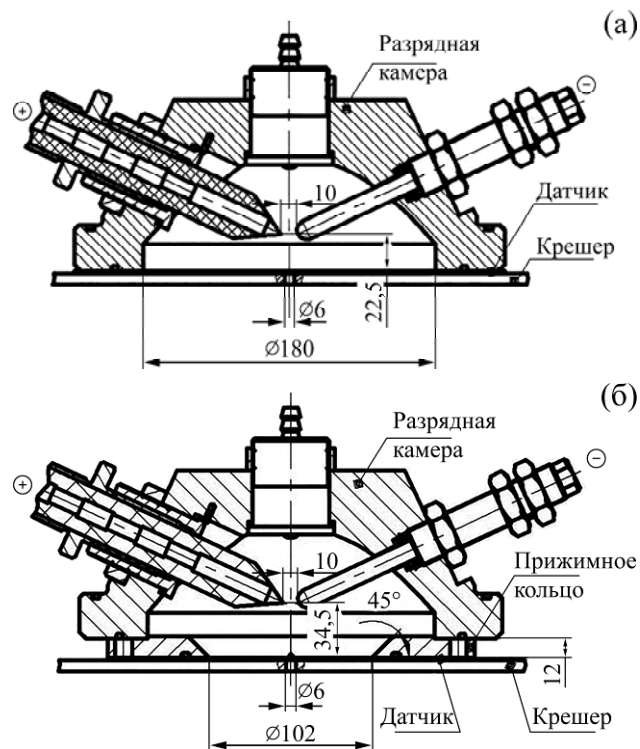


Рис. 2. Схемы экспериментов [3] по определению влияния прижимных колец для камеры: без прижимного кольца (а) и с прижимным кольцом (б).

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, что определяет актуальность выполнения дальнейших исследований.

Цель данной работы – изучить влияние некоторых осесимметричных форм разрядных камер, используемых для многих вариантов ЭГШ, на эффективность преобразования энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, в энергию пластического деформирования листовых материалов из высокопрочных сплавов.

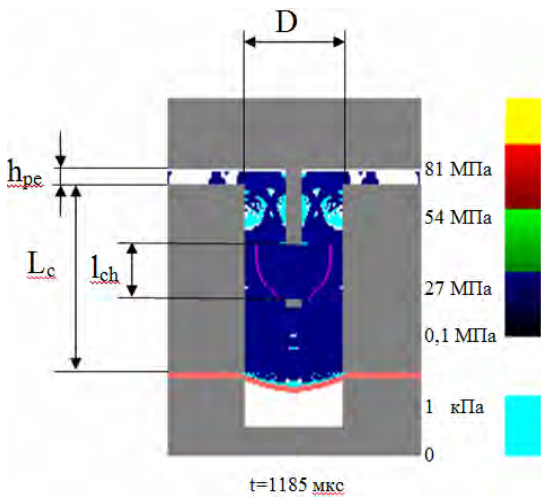


Рис. 3. Схема полости разрядной камеры № 1 (объем 2 л).

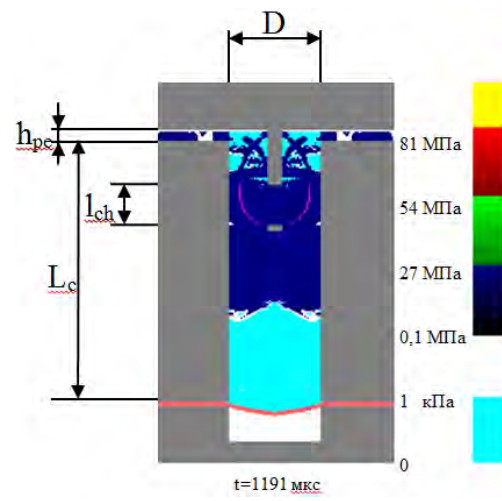


Рис. 4. Схема полости разрядной камеры № 2 (объем 3,85 л).

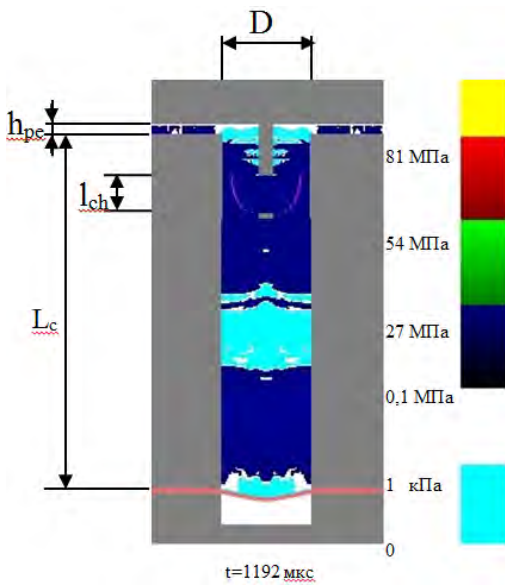


Рис. 5. Схема полости разрядной камеры № 3 (объем 5,65 л).

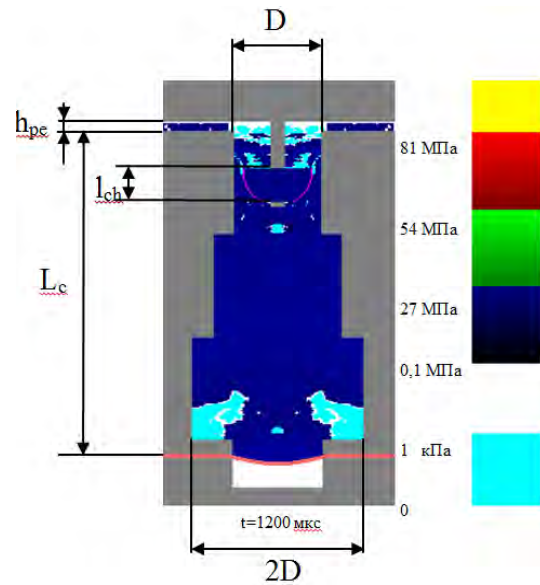


Рис. 6. Схема полости разрядной камеры № 4 (объем 12,5 л).

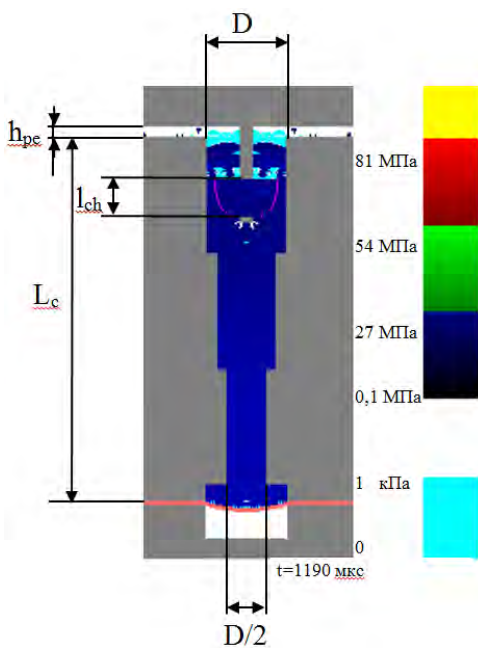


Рис. 7. Схема полости разрядной камеры № 5 (объем 3,3 л).

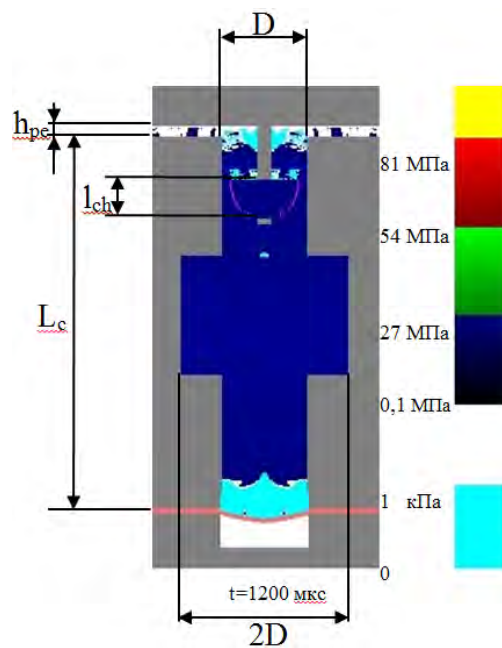


Рис. 8. Схема полости разрядной камеры № 6 (объем 11,1 л).

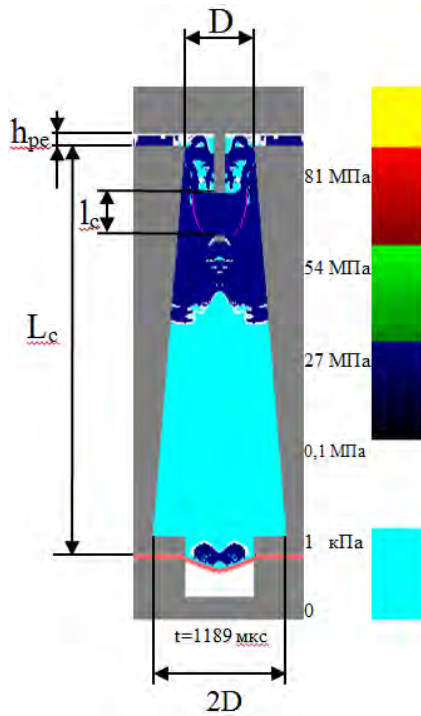


Рис. 9. Схема полости разрядной камеры № 7 (объем 12,9 л).

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается взаимодействие волн давления, генерируемых электрическим разрядом в воде в камерах осесимметричной формы, с деформируемой пластиной, жестко закрепленной между корпусом разрядной камеры и кольцевой открытой матрицей. Исследования выполняли с помощью математической модели, описанной в работе [1]. Использовали следующие упрощающие предположения: теплопроводность и вязкость жидкости пренебрежимо малы, волновыми процессами в канале разряда можно пренебречь, так как скорость звука в нем на порядок больше, чем в жидкости, стенки разрядной камеры абсолютно жесткие. В процессе моделирования учитывали, что материал пластинки упругопластический с деформационным и скоростным упрочнением, имеющий характеристики высокопрочного сплава DP780, а также взаимодействие отраженных от стенки камеры волн с каналом разряда и дифракцию гидродинамических волн на подвижной деформируемой оболочке с учетом отрыва жидкости от ее поверхности и образования между ними кавитационной полости. Полиэтиленовые изоляторы электродов моделировали в приближении идеальной сжимаемой жидкости, имеющей свойство полиэтилена высокого давления. Гидродинамические процессы в камере рассчитывали, исходя из предположения о потенциальном безвихревом движении идеальной жидкости. Канал разряда вначале имеет цилиндрическую

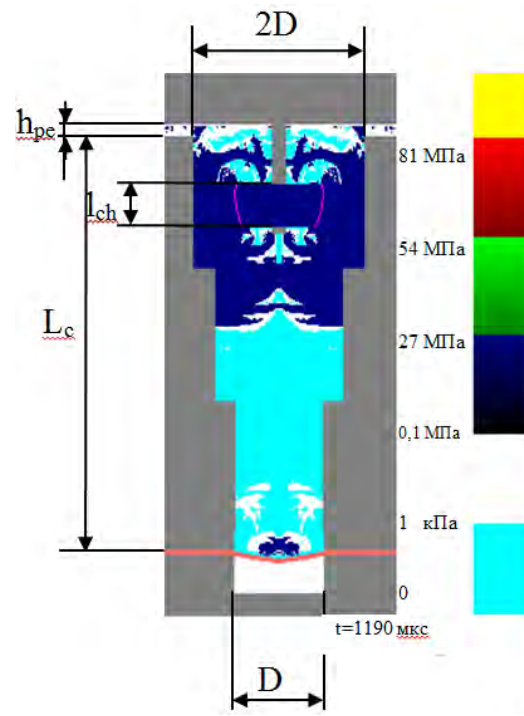


Рис. 10. Схема полости разрядной камеры № 8 (объем 12,5 л).

форму. Учтены процессы преобразования энергии: энергия, запасенная в конденсаторной батарее, выделяется в канале разряда (и активном сопротивлении разрядного контура), вещество в котором нагревается (жидкость испаряется и ионизируется) и расширяется, передавая часть энергии окружающей его жидкости, воздействующей на объект обработки (тонкая пластина) и деформирующей его.

В процессе исследования геометрическим параметрам полостей разрядных камер задавали следующие значения: диаметр разрядной камеры ( $D = 120$  мм); расстояние между электродами ( $l_{ch} = 50$  мм); толщина полиэтиленового изолятора ( $h_{pe} = 14$  мм), высота корпуса разрядной камеры ( $L_c$  от 180 до 500 мм). Длина стержня высоковольтного электрода на 60 мм больше толщины полиэтиленовой прокладки  $h_{pe}$ . В схеме № 1 (см. рис. 3)  $L_c = 180$  мм. В схеме № 2 (см. рис. 4)  $L_c = 340$  мм. В остальных схемах (см. рис. 5–10)  $L_c = 500$  мм. Параметры разрядного контура:  $U_0 = 30$  кВ;  $C = 10$  мкФ;  $L = 9,5$  мкГн; сопротивление элементов разрядного контура без канала разряда  $R_{sh} = 0,04$  Ом. Считали, что инициирование разряда осуществлялось высоковольтным пробоем слоя воды между электродами (самопробоем), вдоль оси разрядной камеры.

В работе рассмотрены схемы разрядных камер, на которых изображены поля давления в них в указанный момент времени, после завершения пластической деформации пластины (рис. 3–10). В правой части рисунков приведена

шкала давления. Длина разрядной камеры выбрана такой, что время, за которое доходит волна давления до пластины, больше времени протекания электрического тока в разрядном контуре, чтобы электромагнитная помеха не искажала сигнал датчика прогиба [13]. В процессе математического моделирования ЭГШ вычисляли количество энергии, выделившейся в канале разряда и использованной для пластического деформирования пластины, чтобы определить эффективность преобразования энергии, запасаемой в конденсаторной батарее.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведено тестирование математической модели на основе сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными для цилиндрической разрядной камеры, полученными по методу работы [13] по схеме №2 (см. рис.4), которые представлены на рис. 11 и 12. Параметры разрядного контура:  $U_0 = 30$  кВ,  $C = 10$  мкФ,  $L = 9,5$  мкГн,  $l_{ch} = 30$  мм. Из результатов тестирования следует, что математическая модель адекватна экспериментальным данным.

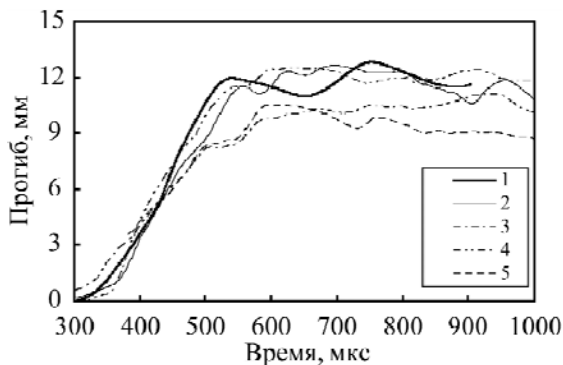


Рис. 11. Изменение максимального прогиба пластины. 1 – расчет; 2–5 – результаты эксперимента.

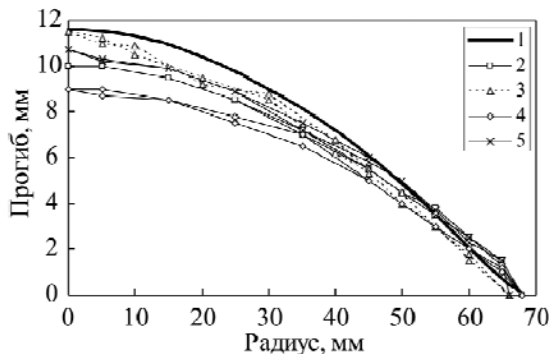


Рис. 12. Форма пластического прогиба пластины. 1 – расчет; 2–5 – результаты эксперимента.

На рис. 13 представлены результаты моделирования распределения энергии в процессе ЭГШ в цилиндрических разрядных камерах № 1–3 длиной от 180 до 500 мм. Из рис. 13 следует, что увеличение объема в 2 раза (кривая 2, схема № 2)

за счет удлинения цилиндрической разрядной камеры приводит к уменьшению энергии пластического деформирования пластины в 1,4 раза по сравнению с короткой камерой (кривая 1, схема № 1). Последующее увеличение объема разрядной камеры не влечет заметных изменений энергии деформирования пластины (кривая 3, схема № 3), что свидетельствует об импульсном характере ее нагружения, при котором объем жидкости, заполняющей камеру, не имеет существенного значения. При выбранных параметрах ЭГШ увеличение длины разрядной камеры практически не влияет на энергию, выделившуюся в канале разряда, и в малой степени влияет на работу расширения парогазовой полости (рис. 13), а также на изменение максимального прогиба пластины в процессе ее деформирования (рис. 14) и конечную форму прогиба пластины (рис. 15). Амплитуда упругих колебаний пластины, относительно полученного пластического прогиба, не превышает  $\pm 10\%$  независимо от длины разрядной камеры, что следует из сравнения данных на рис. 14.

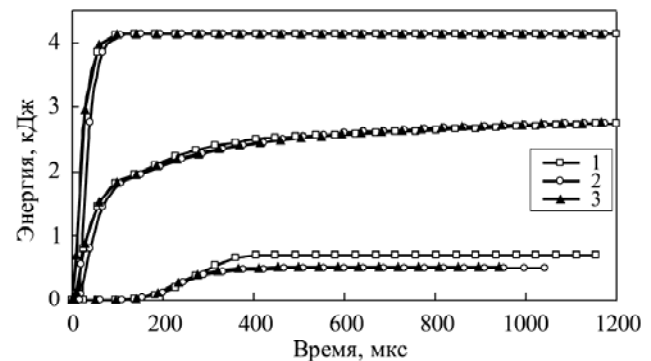


Рис. 13. Изменение энергии в элементах разрядной системы. 1 – схема № 1; 2 – схема № 2; 3 – схема № 3. Верхние кривые (практически совпадают между собой) – энергия, введенная в канал разряда; средние кривые – работа расширения канала разряда и парогазовой полости; нижние кривые (кривые 2 и 3 совмещены по времени пластического деформирования с началом кривой 1) – энергия пластического деформирования пластины.

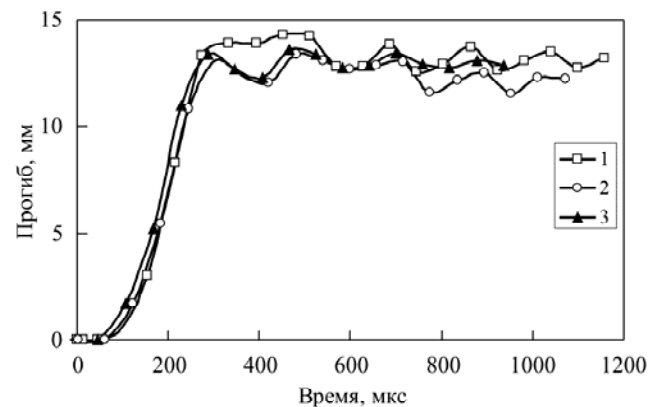


Рис. 14. Изменение максимального прогиба пластины. 1 – схема № 1; 2 – схема № 2; 3 – схема № 3. (кривые 2 и 3 совмещены по времени пластического деформирования с началом кривой 1)

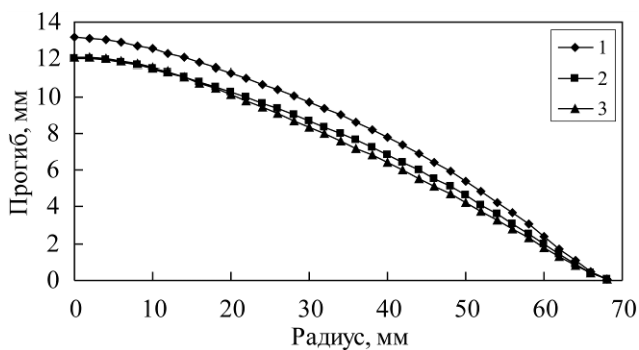


Рис. 15. Форма прогиба пластины. 1 – схема № 1; 2 – схема № 2; 3 – схема № 3.

В отличие от длины цилиндрической разрядной камеры, изменение ее формы существенно влияет на процесс пластического деформирования пластины (рис. 16, 17). На рис. 16 и 17 номера кривых соответствуют номерам схем разрядных камер, показанных на рис. 5–10. Существенные изменения получают прогиб пластины (рис. 17), а также энергия ее пластического деформирования (рис. 16). Результаты моделирования для камер различной формы сравнили с результатами моделирования для длинной цилиндрической разрядной камеры (рис. 5).

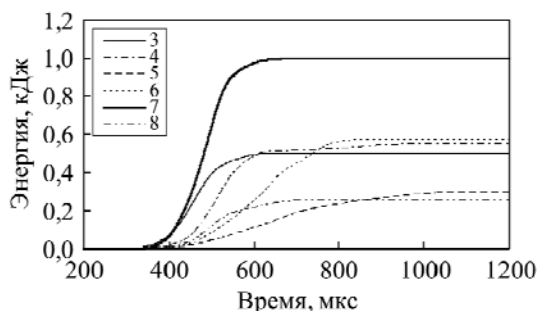


Рис. 16. Энергия пластического деформирования пластин.

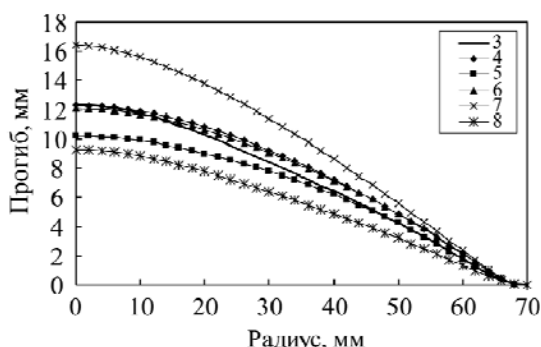


Рис. 17. Форма пластического прогиба пластин.

Использование схем разрядных камер № 4 (рис. 6) и № 6 (рис. 8) приводит к сравнимому максимальному конечному прогибу пластины. Разрядная камера, изображенная на схеме № 4, ступенчато расширяется в сторону заготовки, при этом диаметр ее нижней части в два раза больше верхней ( $D$ ). В ее нижней части конструктивно также присутствует прижимное

кольцо, как на рис. 1 и 2б. Разрядная камера, показанная на схеме № 6, имеет промежуточную цилиндрическую полость, диаметр которой в 2 раза больше, чем нижняя и верхняя части камеры ( $D$ ). Она расположена посередине высоты камеры ( $L_c$ ) и занимает третью часть ее длины. Максимальный прогиб заготовки в указанных случаях близок к прогибу, получаемому с использованием длинной цилиндрической разрядной камеры № 3, но полнота прогиба (объем полости прогиба заготовки) с применением ступенчатых камер больше, в результате чего работа деформирования в 1,1 (схема № 4) и 1,15 (схема № 6) раза увеличивается по сравнению с разрядной камерой № 3. В схеме № 6 длительность процесса деформирования в 1,36 раза больше по сравнению с использованием цилиндрической камеры № 3, поэтому скорость деформации и соответственно пластичность материала меньше [14].

Существенное отличие деформирования пластины с цилиндрической разрядной камерой № 3 наблюдается при использовании разрядных камер № 5 (рис. 7) и № 8 (рис. 10). Разрядная камера № 8 ступенчато сужается к заготовке от диаметра  $2D$  до  $D$ . При этом в районе канала разряда ее диаметр равен  $2D$ . Разрядная камера № 5 имеет сверху диаметр  $D$  и ступенчато равномерно сужается по направлению к заготовке до  $D/2$ . Энергия пластического деформирования при использовании схемы № 5 в 1,8 раза меньше, чем при использовании цилиндрической разрядной камеры, а длительность процесса деформирования в 2 раза больше, что уменьшает пластичность материала [14]. Энергия пластического деформирования пластины с использованием схемы № 8 в 2 раза меньше, чем схемы № 3, при одинаковом времени ее деформирования, а форма ее прогиба близка к форме прогиба, полученной при использовании схемы № 3.

Чтобы оценить влияние ступенчатых изменений формы на процесс деформирования пластины, форму разрядной камеры № 4 (рис. 6) заменили непрерывной конической формой № 7 (рис. 9), расширяющейся в сторону заготовки от диаметра  $D$  до  $2D$ . Она является предельным случаем ступенчатого изменения внутреннего диаметра разрядной камеры № 4 (рис. 6). В нижней части конической разрядной камеры № 7 конструктивно присутствует прижимное кольцо, как в схеме № 4 и на рис. 1 и 2б. Непрерывный профиль камеры № 7 приводит к увеличению энергии деформирования пластины в 1,9 раза по сравнению с камерой № 4, что свидетельствует о большей эффективности деформирования пластин с использованием гладких профилей разрядных камер по сравнению со ступенчатыми

профилями. Коническая разрядная камера № 7 обеспечивает увеличение прогиба пластины в 1,3 раза и энергии пластического деформирования в 2 раза по сравнению с цилиндрической камерой № 3. Время процесса деформирования пластины такое же, как и для цилиндрической разрядной камеры № 3. При этом форма прогиба пластины сравнима с формой ее прогиба, полученной при использовании цилиндрической разрядной камеры № 3.

### ВЫВОДЫ

При одинаковой запасенной энергии 4,5 кДж увеличение объема цилиндрической полости разрядной камеры от 1,8 до 5,4 литра (в 3 раза), при остальных фиксированных параметрах, приводит к уменьшению энергии пластического деформирования листовых материалов в 1,4 раза.

Положительно влияют на деформирование пластины расширяющиеся в ее сторону разрядные камеры ступенчатой формы, а также конические разрядные камеры, создающие благоприятные условия для отражения волн, генерируемых электрическим разрядом в воде, в сторону заготовки и направленное воздействие энергетических потоков на объект обработки.

При одной и той же запасаемой энергии наибольшую эффективность пластического деформирования пластины по сравнению с цилиндрической камерой равной высоты обеспечивает расширяющаяся в ее сторону полость разрядной камеры конической формы. Увеличение диаметра основания конуса в два раза, при его высоте в три раза большей, чем диаметр его меньшего основания, обеспечивает повышение максимального прогиба пластины в 1,3 раза и энергии пластического деформирования в 2 раза. Это происходит, несмотря на увеличение объема полости разрядной камеры конической формы в 2,28 раза (от 5,65 до 12,9 литра) по сравнению с цилиндрической разрядной камерой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2015, **51**(6), 581–588. DOI: 10.3103/S1068375515060113.
2. Чачин В.Н., Шадуя В.Л., Журавский А.Ю., Здор Г.Н. *Электрогидроимпульсное формование с использованием замкнутых камер.* Минск: Наука и техника, 1985. 200 с.
3. Жовноватюк Я.С. *Авиационно-космическая техника и технология.* 2011, **85**(8), 15–19.

4. Мазуровский Б.Я., Сизев А.Н. *Электрогидравлический эффект в листовой штамповке.* К.: 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. *J Mater Process Technol.* 2012, **212**(5), 1070–1079. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.12.014.
7. Hassennejadasl A., Daniel E.G., Golovashchenko S.F., Javad S. et al. *J Manuf Process.* 2014, **16**(3), 391–404. DOI: 10.1016/j.jmapro.2014.04.004.
8. Mamutov V., Golovashchenko S., Mamutov A. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> international LS-DYNA Conference, June 8 – 14. 2014. Detroit, USA, 2014.* 1–9.
9. Hassennejadasl Amir. *Simulation of Electrohydraulic Forming Using Anisotropic, Rate-dependent Plasticity Models.* Electronic Theses and Dissertations. 2014, (5), 520.
10. Gillard A.J., Golovashchenko S.F., Mamutov A.V. *J Manuf Process.* 2013, **15**(2), 201–218. DOI: 10.1016/j.jmapro.2012.12.005.
11. Golovashchenko S.F., Gillard A.J., Mamutov A.V. *J Mater Process Technol.* 2013, **213**(7), 1191–1212. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.026.
12. Golovashchenko S.F., Gillard A.J., Mamutov A.V., Bonnen J.F. et al. *J Mater Process Technol.* 2014, **214**(4), 1027–1043. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.09.003.
13. Kosenkov V.M., Kuz'menko V.G. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2016, **52**(5), 487–493. DOI: 10.3103/S1068375516050070.
14. Косенков В.М. *Письма о материалах.* 2014, **4**(1), 18–21. DOI: 10.22226/2410-3535-2014-1-18-21.

Поступила 11.07.17

### Summary

A mathematical simulation of the electrohydraulic forming using some types of stepped axisymmetric discharge chambers is performed. The mathematical model was tested on the base of experimental data obtained using the optical method of measuring the deflection of a plate. It is shown that the change in the shape of the discharge chamber can significantly affect the efficiency of electrohydraulic forming with equal parameters of the discharge circuit. It is found that the discharge chamber of the conical shape had the highest forming efficiency than all others considered in the paper.

*Keywords: electric discharge in water, pulse deformation of plates, discharge chamber, electrohydraulic forming.*