

УДК 621.7.044

**Я.С. ЖОВНОВАТЮК***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ПУТИ СТАБИЛИЗАЦИИ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПОЛЕЙ НАГРУЖЕНИЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ ЗА СЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

*Рассмотрены основные способы увеличения эффективности нагружения заготовки ударными волнами с целью формообразования локальных элементов большой кривизны, а также отверстий и пазов. Показана возможность увеличения энергоэффективности процесса электрогидроимпульсной штамповки на стадии проектирования как электрогидравлических прессов (а именно их разрядных камер), так и технологической оснастки (профилирование концентраторов и прижимных плит). Выявлены области эффективного применения рассмотренных способов стабилизации и интенсификации полей нагружения ударными волнами.*

**Ключевые слова:** отверстие, локальный элемент большой кривизны, разрядная камера, концентратор.

### Введение

В машиностроении существует большая номенклатура листовых деталей, характеризующихся наличием следующих конструктивных элементов:

- большое количество отверстий и (или) пазов на дне или боковых стенках детали (вентиляционные отверстия на кожухах агрегатов, установочные отверстия и т.п.);
- рифты или пуклевки (ребра жесткости корпусных деталей, каналы радиаторов и т.д.);
- мелкий нерегулярный профиль с характерными размерами, соотносимыми с толщиной листа детали (например при художественной чеканке).

Изготовление данных конструктивных элементов способом электрогидроимпульсной штамповки (ЭГШ) сопряжено с необходимостью создания равномерного и интенсивного поля нагружения ударными волнами на формообразуемой поверхности.

Большинство серийных электрогидравлических прессов имеет разрядные камеры, в которых организована двухэлектродная схема разряда, при этом осуществляется свободный пробой межэлектродного промежутка. Но такой вариант не обеспечивает оптимальных условий и стабильности энерговыделения, что приводит к неравномерности распределения давления по полю нагружения и непостоянству его интенсивности [1, 2]. Таким образом, для выполнения качественного формообразования вышеуказанных конструктивных элементов необходимо применение специальных схем осуществления разряда или специальной технологической оснастки.

Следовательно, можно выделить следующие пути стабилизации поля погружения ударными вол-

нами, увеличения эффективности при разряде, а также повышения уровня энергии ударной волны, используемой для формообразования заготовки:

- на этапе проектирования разрядных камер и оснастки:
  - использование разрядных камер с оптимальной формой отражающей поверхности;
  - применение многоэлектродных разрядных блоков;
  - профилирование отражающих поверхностей прижимных колец и (или) использование концентраторов ударных волн;
- специальные технологические способы:
  - инициация разряда проводниками (применение взрывающихся проволочек);
  - единственный проводник;
  - массив проводников;
  - увеличение расстояния от канала разряда до формообразующей поверхности;
  - использование кумулятивного эффекта;
  - увеличение энергии разряда за счет увеличения зарядного напряжения.

Рассмотрим способы повышения эффективности разряда за счет использования принципов оптимального проектирования разрядных камер электрогидравлических (ЭГ) прессов и технологической оснастки.

### 1. Конструктивные способы увеличения эффективности формообразования

#### 1.1. Оптимизация формы разрядных камер

Как указано в работе [3], оптимальной формой отражающей поверхности камеры при взрывной

штамповке является параболическая поверхность, создающая при подрыве заряда в фокусе плоскую отраженную ударную волну, которая при нормальном падении на заготовку отдает ей максимально возможную энергию. При этом парабола описывается уравнением:

$$r^2 = 1,27R_k x, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус сечения камеры на высоте  $x$ ;

$R_k$  – радиус выходного сечения камеры.

Однако параболическая поверхность нетехнологична в изготовлении, поэтому в работах [4, 5] она аппроксимируется конической и сферической поверхностями соответственно. При использовании конической отражающей поверхности для обеспечения одновременного нагружения всех точек заготовки необходимо чтобы отношение глубины камеры к диаметру ее выходного сечения примерно равнялось 0,3. Для сферической поверхности определена зависимость расстояния от оси электродов до выходного сечения камеры от ее диаметра для получения равномерного поля нагружения. Также в работе [6] предложена методика расчета давления, создаваемого прямыми и отраженными ударными волнами для разрядных камер произвольной формы.

Было проведено экспериментальное исследование эффективности нагружения заготовки ударными волнами для разрядных камер с параболическо-цилиндрической (рис. 1, а) и коническо-цилиндрической (рис. 1, б) отражающими поверхностями.

Измерение полей нагружения ударными волнами производилось при помощи многоместных мембранных датчиков давления (ММДД) по методике, предложенной в работе [7]. При этом диаметр отверстия ММДД составлял 6 мм, а в качестве мембран использовался лист из алюминиевого сплава АМцАМ толщиной 1 мм. Данное соотношение размеров обусловлено необходимостью исключить влияние гидротока и квазистатического давления.

Эксперименты выполнялись при значениях зарядного напряжения 20 кВ, зарядной емкости 33,2 мкФ, межэлектродного промежутка 20 мм и расстоянии до ММДД 110 мм. При этом индуктивность разрядного контура составляла 0,5 мкГн, а запасаемая энергия – 6,6 кДж. Типовые поля распределения давлений представлены на рис. 2. Обобщенные (усредненные по серии опытов) результаты экспериментов сведены в табл. 1.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о крайней неэффективности использования параболической отражающей поверхности при необходимости получения равномерного поля нагружения, поскольку средний приведенный разброс давлений составил почти 115,96 % для серии опытов ((90,18...139,76)% для отдельных экспериментов), а

среднеквадратическое отклонение – 12,16 МПа ((15,36...10,55) МПа).

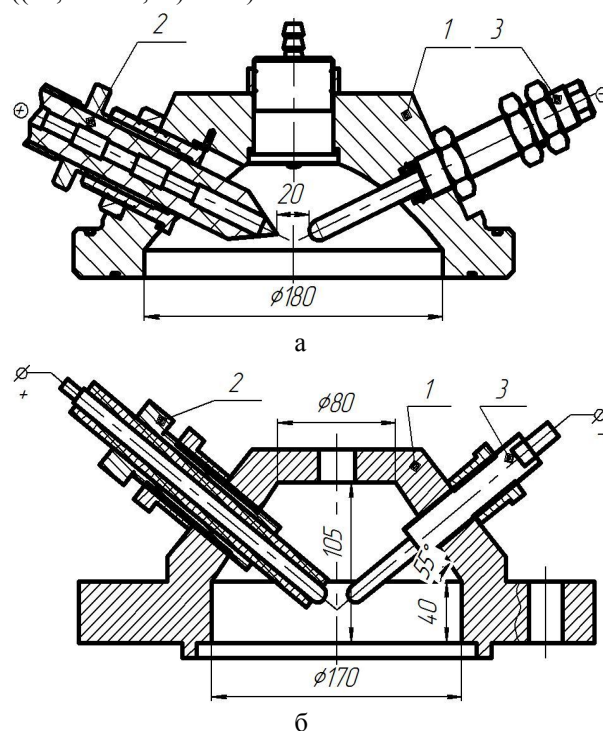


Рис. 1. Схемы исследуемых разрядных камер:  
а – параболическо-цилиндрическая;  
б – коническо-цилиндрическая;  
1 – разрядная камера; 2 – изолированный электрод;  
3 – «массовый» электрод

Таблица 1

Основные экспериментальные результаты для параболическо-цилиндрической и коническо-цилиндрической разрядных камер

Тип разрядной камеры	Максимальное давление, МПа	Минимальное давление, МПа	Среднее давление, МПа
параболическо-цилиндрическая	75,5	18,9	48,8
коническо-цилиндрическая	67,4	48,2	57,6
Тип разрядной камеры	Приведенный разброс давлений, %	Среднеарифметическая погрешность, %	Среднеквадратическое отклонение, МПа
параболическо-цилиндрическая	115,96	20,08	12,16
коническо-цилиндрическая	33,36	7,52	5,24

Такую значительную неравномерность поля можно объяснить наличием в разрядной камере электродов, создающих большие зоны затенения, препятствующие свободному распространению как прямых, так и отраженных ударных волн. Также их затуханию способствует наличие конструктивной выборки в отражающей поверхности разрядной камеры, выполненной с целью предотвращения пробоя на стенку.

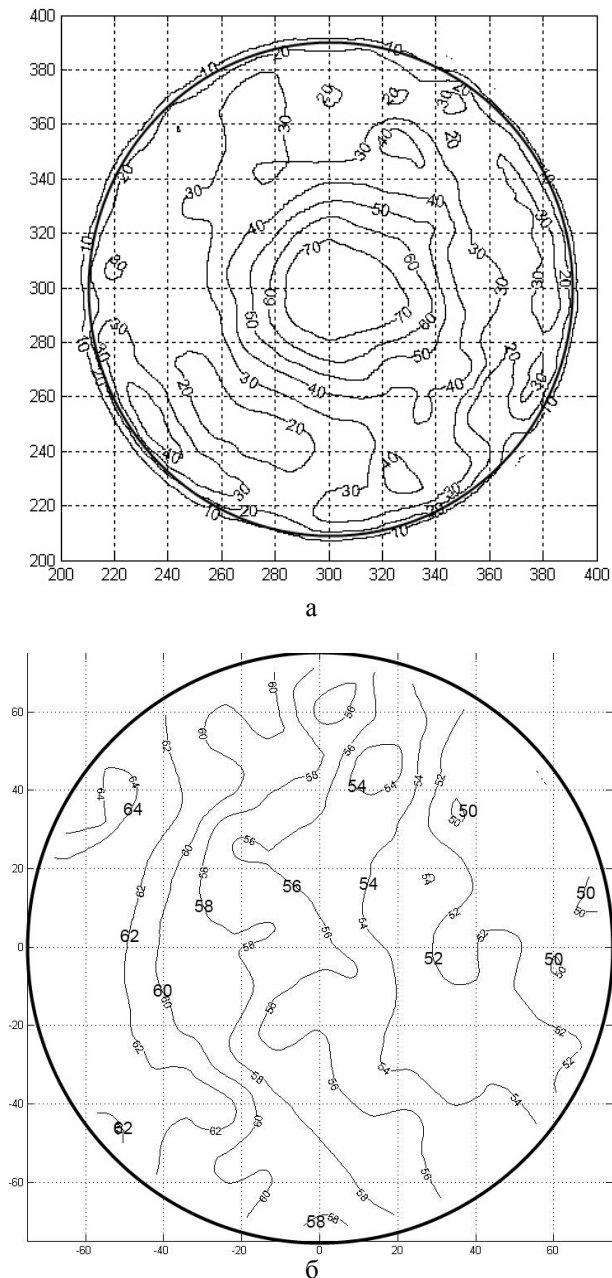


Рис. 2. Типовые поля давлений, образуемые разрядными камерами с отражающими поверхностями:  
 а – с параболическо-цилиндрической;  
 б – коническо-цилиндрической

Хотя коническо-цилиндрическая разрядная камера показала значительно лучшие результаты по равномерности поля нагружения (среднее средне-квадратическое отклонение 5,24 МПа при максимальном 11,07 МПа), однако даже такие значения при сопутствующем большом разбросе результатов по максимальному давлению (72,58...60,22) МПа не обеспечивают достаточной стабильности поля давлений для качественного изготовления сложных изделий.

## 1.2. Многоэлектродные разрядные блоки

Применение многоэлектродных разрядных блоков (МРБ) позволяет значительно увеличить площадь зоны интенсивного нагружения ударными волнами за счет использования нескольких электродных пар, разнесенных в объеме разрядной камеры. Дальнейшим развитием данного оборудования является применение электродных пар направленного воздействия (ЭПНВ) [8]. При нескольких использованных ЭПНВ возникает эффект нелинейного увеличения концентрации и максимальной интенсивности нагружения. Так, в случае, когда 6 ЭПНВ окружают одну, максимальное давление увеличилось в 4,56 раза (хотя результатом алгебраического суммирования давлений от всех работающих ЭПНВ являлось его повышение всего в 1,6 раза), а площадь нагружения давлением, максимальным при использовании одной ЭПНВ, возросла в 362 раза.

Таким образом, применение МРБ с ЭПНВ целесообразно при изготовлении деталей большого размера, либо при необходимости локального нагружения детали давлением, превосходящим технологические возможности другого оборудования. Также возможен путь миниатюризации ЭПНВ для использования эффекта нелинейного увеличения давления при производстве небольших деталей.

## 1.3. Технологическая оснастка

Применение концентраторов, а также прижимных плит со специально спрофилированной отражающей поверхностью, позволяет сконцентрировать воздействие энергосиловых факторов разряда в необходимых областях, что увеличивает эффективность формообразования детали. Так, при вырубке изделий по наружному контуру (а также пробивке боковых и периферийных отверстий), используются конические концентраторы, устанавливаемые в центральной части заготовки [9]

Также для стабилизации и интенсификации нагружения детали применяется профилирование прижимных плит. Так, в ходе выполнения исследования по увеличению эффективности применения разрядной камеры с параболическо-цилиндрической отражающей поверхностью применялись кольцоконцентраторы конического профиля. Схемы экспериментов представлены на рисунке 3.

Эксперименты выполнялись при значениях зарядного напряжения 15 кВ, зарядной емкости 33,2 мкФ и межэлектродного промежутка 10 мм. При этом индуктивность разрядного контура составляла 0,5 мкГн, а запасаемая энергия – 3,7 кДж. Типовое поле давлений, получаемое при использовании профилированного прижимного кольца пред-

ставлено на рис. 4. Обобщенные (усредненные по серии опытов) результаты экспериментов сведены в табл. 2.

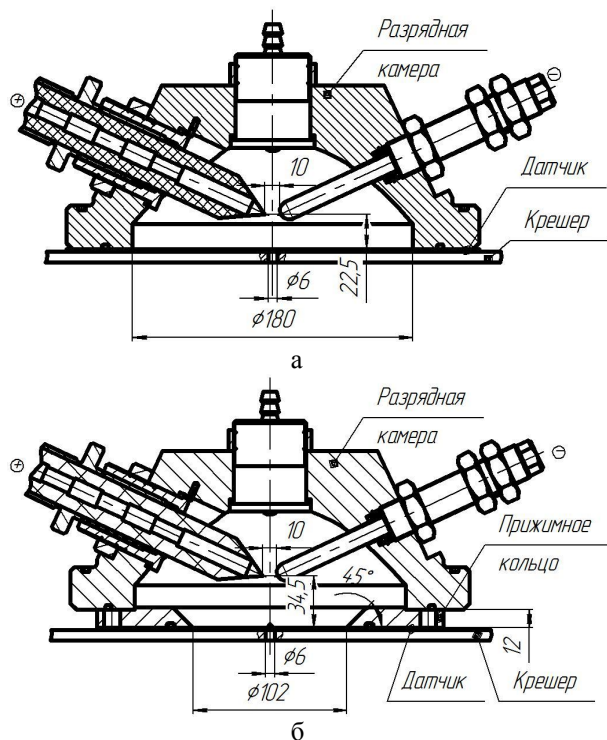


Рис. 3. Схемы экспериментов по определению влияния прижимных колец:  
а – без прижимного кольца;  
б – с прижимным кольцом



Рис. 4. Типовое поле давлений при использовании профилированного прижимного кольца

Таблица 2  
Основные экспериментальные результаты по определению влияния прижимных колец

Прижимное кольцо	Максимальное давление, МПа	Минимальное давление, МПа	Среднее давление, МПа
нет	79,4	8,2	18,3
есть	67,5	47,2	56,1
Прижимное кольцо	Приведенный разброс давлений, %	Среднеарифметическая погрешность, %	Среднеквадратическое отклонение, МПа
нет	388,20	36,07	11,28
есть	36,17	8,90	5,74

Как видим, наблюдается значительное увеличение равномерности поля нагружения. Так, приведенный разброс давлений уменьшился более чем в 10 раз, а среднеквадратическое отклонение давления – более чем в 2 раза при одновременном увеличении среднего давления более чем в 3 раза. Данное явление объясняется уменьшением площади нагружаемой поверхности в 3,1 раза и соответственной концентрацией энергии ударной волны.

В лаборатории ЭГШ ХАИ обнаружен эффект увеличения давления в периферийной области заготовки, в случае, если диаметр выходного отверстия разрядной камеры меньше диаметра матрицы. Проведенные эксперименты показали локальное повышение давления вплоть до значений, возникающих в центральной зоне нагружения [10]. Данный эффект обусловлен многократным отражением ударной волны в угловой замкнутой зоне и, соответственно, ее многократным наложением с возникновением эффекта нелинейного взаимодействия, подобного описанному в пункте 1.2.

## Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

- применение разрядных камер с параболической отражающей поверхностью не позволяет получить равномерное поле нагружения как при взрывной штамповке, напротив конические разрядные камеры показывают более высокую равномерность поля давлений;

- использование МРБ с ЭПНВ дает возможность изготовления деталей большого размера за счет нелинейного возрастания интенсивности нагружения при увеличении количества используемых ЭПНВ при одновременном повышении площади, нагружаемой потребным для формообразования давлением;

- применение концентраторов давления, а также профилированных прижимных плит позволяет увеличить равномерность поля нагружения, а

также сосредоточить энергосиловые факторы разряда в зонах формоизменения заготовки.

### Литература

1. Мазуровский Б.Я. *Электрогидравлический эффект в листовой штамповке: монография* / Б.Я. Мазуровский, А.Н. Сизев. – К.: Наук. думка, 1983. – 192 с.

2. *Pressure field stabilization in high-voltage underwater pulsed metal forming using wire-initiated discharges* / I. Eguia, J. S. Jose, M. Knyazuzev, Ya. Zhovnovatyuk // *Key Engineering Materials*. – 2011. – Vol. 473 (2011). – P. 965-972.

3. Исаенко В.И. *К вопросу выбора параметров камер для взрывных прессов* / В.И. Исаенко, В.К. Борисевич, С.Л. Каныгин // *Импульсная обработка металлов давлением: темат. сб. науч. тр.* – Харьков. авиац. ин-т. – X., 1980. – Вып. 8. – С. 129-132.

4. Рябинин А.Г. *К вопросу об оптимизации формы разрядной камеры при электрогидроимпульсной штамповке* / А.Г. Рябинин, К.К. Мертенс, В.С. Мамутов, В.А. Вагин // *Высокоскоростная обработка материалов давлением: сб. науч. тр.* – 1982. – Вып. 8. – С. 120-125.

5. Генкин Б.С. *К расчету разрядных камер для электрогидравлической штамповки* / Б.С. Генкин, А.Ю. Святенко, Л.Г. Костин // *Высокоскоростная*

*обработка материалов давлением: сб. науч. тр.* – 1982. – Вып. 8. – С. 118-120.

6. Жовноватюк Я.С. *Моделирование нагружения заготовки ударными волнами в разрядных камерах электрогидроимпульсных прессов* / Я.С. Жовноватюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 4 (71). – С. 12-16.

7. Долматов А.И. *Методика измерения полей нагружения при электрогидроимпульсной штамповке листовых деталей* / А.И. Долматов, М.К. Князев, Я.С. Жовноватюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 8 (44). – С. 14-20.

8. Борисевич В.К. *Формирование поля давления на заготовке при штамповке при электрогидравлических установках* / В.К. Борисевич, Ю.И. Чебанов, М.К. Князев // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1996. – № 4. – С. 15-18.

9. *Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта: монография* / Г.А. Гулый, П.П. Малюшевский, Е.В. Кривицкий [и др.]; под ред. Г. А. Гулого. – М.: Машиностроение, 1977. – 320 с.

10. Долматов А.И. *Исследование полей нагружения криволинейных поверхностей при электрогидравлической штамповке* / А.И. Долматов, Я.С. Жовноватюк, В.И. Савченко // *Вісник Інженерної академії України*. – 2008. – № 1. – С. 160-164.

Поступила в редакцию 26.05.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ШЛЯХИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПОЛІВ НАВАНТАЖЕННЯ УДАРНИМИ ХВИЛЯМИ ПРИ ЕЛЕКТРОГІДРОІМПУЛЬСНОМУ ШТАМПУВАННІ ЗА РАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ ВИРІШЕНЬ

Я.С. Жовноватюк

Розглянуті основні способи збільшення ефективності навантаження заготовки ударними хвилями з метою формоутворення локальних елементів великої кривизни, а також отворів та пазів. Показана можливість збільшення енергоефективності процесу електрогидроімпульсного штампування на стадії проектування як електрогидравлических пресів (а саме їх розрядних камер), так і технологічного оснащення (профілювання концентраторів та притискних плит). Виявлені області ефективного використання розглянутих способів стабілізації та інтенсифікації полів навантаження ударними хвилями.

**Ключові слова:** отвір, локальний елемент великої кривизни, розрядна камера, концентратор.

### WAYS OF STABILIZATION AND INTENSIFICATION OF SHOCK WAVES LOADING FIELDS AT ELECTROHYDROIMPULSE FORMING BY DESIGN SOLUTIONS

Y.A.S. Zhovnovatyuk

General methods of shock waves blank loading effectiveness increasing for high curvature local elements, holes and slots forming were considered. Possibility of electrohydroimpulse forming process energy effectiveness increasing during design stage of electrohydraulic presses (discharge chambers) and technological equipment (concentrators and clamping plates profiling) was demonstrated. Fields of effective application of discussed methods of stabilization and intensification of shock waves loading fields were revealed.

**Key words:** hole, high curvature local elements, discharge chamber, concentrator.

**Жовноватюк Ярослав Сергеевич** – научный сотрудник кафедры технологии производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина, e-mail: yargoslavzhovnovatyuk@yandex.ru.