

УДК 621.7.044:[519.8:534.2]

Я.С. ЖОВНОВАТЮК*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ
В РАЗРЯДНЫХ КАМЕРАХ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫХ ПРЕССОВ**

Рассмотрены исследования по моделированию нагружения заготовки ударными волнами в разрядных камерах простой формы электрогидроимпульсных прессов. Установлены исходные данные для расчета поля нагружения заготовки прямыми и отраженными ударными волнами и указаны основные допущения, принятые при расчете. Представлены расчетные схемы и основные математические зависимости для определения путей распространения ударных волн в разрядных камерах различного профиля с различным расположением точки разряда в полости камеры. Выбраны расчетные формулы определения максимального давления на заготовке при воздействии ударных волн. Намечены пути совершенствования расчетной модели.

Ключевые слова: разрядная камера, прямые и отраженные ударные волны, поле нагружения.

Введение

Как известно, способ электрогидроимпульсной штамповки (ЭГШ) позволяет уменьшить стоимость технологической оснастки, а также снизить длительность подготовки производства, что в случае единичного и мелкосерийного производства значительно уменьшает затраты на подготовку производства. Однако выполнение некоторых операций (например, вырубки или калибровки) способом ЭГШ требует интенсивного и равномерного поля нагружения заготовки прямыми и отраженными ударными волнами. В общем случае основное влияние на распространение ударных волн оказывает геометрическая форма разрядной камеры, а также наличие внутри камеры электродов, которые препятствуют свободному отражению ударных волн от стенок разрядной камеры, создавая зоны затенения [1].

Первоначально исследования оптимальной формы отражающей поверхности камер, обеспечивающей равномерность поля нагружения, проводились для взрывных прессов. Было установлено, что оптимальной формой взрывной камеры является параболическая поверхность, при этом подрыв заряда необходимо осуществить в фокусе параболы. При этом парабола описывается формулой (1) [2]:

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

где r – радиус взрывной камеры в сечении x ;

R_K – радиус выходного сечения камеры.

Поскольку изготовление параболической поверхности взрывной камеры на станках с ЧПУ связано со значительными затратами, то последующие исследования связаны с определением более технологичной упрощенной формы взрывной камеры без

снижения ее отражающей эффективности. Так, в работе [3] предложено аппроксимировать параболическую поверхность конической. При этом для обеспечения одновременного нагружения всех точек заготовки необходимо чтобы отношение глубины камеры к ее выходному сечению примерно равнялось 0,3.

В работе [4] была предпринята попытка аппроксимировать параболическую поверхность сферической, результатом чего стала зависимость расстояния от оси электродов до выходного сечения камеры от ее диаметра для получения равномерного поля нагружения.

Однако проведенные исследования рассматривают лишь простые формы разрядных камер с фиксированной точкой выделения энергии, тогда как используемые на практике разрядные камеры имеют довольно сложную пространственную форму с "плавающей" (не имеющей точного местоположения) точкой разряда.

Математическое описание распространения ударных волн в таких камерах представляет очень сложную задачу, которую можно решить только при помощи дискретных методов.

1. Исходные данные и допущения

Предлагаемый способ расчета позволяет произвести определение поля давлений, создаваемого прямыми и отраженными ударными волнами, на плоской преграде под разрядными камерами различной формы.

Исходными данными для расчета являются:

– геометрия полости разрядной камеры;

- координаты точки разряда $M_p(x_p, y_p, z_p)$;
- координаты плоскости преграды $M_{пр}(x_{пр}, y_{пр}, z_{пр})$;
- начальное напряжение заряда конденсаторной батареи U_0 , [В];
- емкость C , [Ф] и индуктивность L , [Гн] разрядного контура;
- плотность передающей среды ρ_0 , [кг/м³];
- искровая постоянная: для свободного разряда $A = 10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с/м}^2$, при иницировании разряда взрывающейся проволочкой $A = 0,25 \cdot 10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с/м}^2$.

Для расчета приняты следующие основные допущения.

1. Распространение ударных волн считаем одинаковым по всему объему камеры.
2. При падении ударной волны на жесткую преграду угол отражения равен углу падения.
3. При отражении от разрядной камеры часть энергии ударной волны преломляется и переходит в стенку, при этом энергия отразившейся ударной волны составляет 95% от исходной.
4. Канал разряда заменяем точкой, расположенной в произвольном месте между электродами.
5. При падении на один и тот же участок преграды фронтов от нескольких ударных волн суммарное давление ударной волны определяется алгебраическим суммированием давлений на фронте каждой ударной волны.
6. При двух и более отражениях ударной волны от жестких стенок камеры давление на ее фронте принимаем равным нулю.
7. Считаем, что отраженные ударные волны ото всех участков отражающей поверхности разрядной камеры приходят к преграде в один и тот же момент времени.

2. Расчетные схемы и зависимости

Для осуществления расчета движения ударной волны в разрядной камере первоначально необходимо представить отражающую поверхность камеры как дискретное множество точек, лежащих на ней.

Определение точек начинаем с выходного сечения разрядной камеры двигаясь к ее вершине. При этом чем меньше расстояние между точками (т.е. чем больше количество точек выбрано), тем точнее выполняется расчет [5].

Далее каждые три точки объединяются в треугольники, аппроксимирующие отражающую поверхность разрядной камеры (рис. 1).

На следующем этапе выделим на плоскости преграды конечную область и зададим ее макси-

мальные и минимальные координаты и также разобьем данную область на точки с определенным шагом по осям OX , OY и OZ (рис. 2).

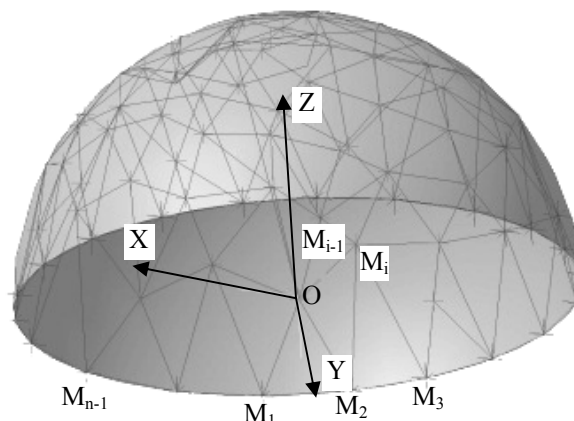


Рис. 1. Схема аппроксимации отражающей поверхности разрядной камеры треугольниками: $M_i(x_i, y_i, z_i)$ – точки, описывающие отражающую поверхность разрядной камеры

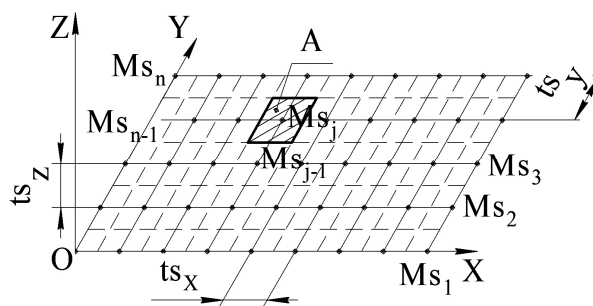


Рис. 2. Схема разбиения области плоскости преграды на точки: $M_{s_i}(x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i})$ – точки преграды, ts_x , ts_y , ts_z – шаг точек по осям OX , OY и OZ соответственно, A – элементарная площадка преграды, приведенная к точке M_{s_j}

Следующим шагом является определение поля давлений на преграде, возникающего под воздействием прямой ударной волны.

Для этого проводим лучи, исходящие из точки разряда и проходящие через точки, описывающие выходное сечение камеры, и определим координаты точек $M_{ргr}v_i$ их пересечения с плоскостью преграды.

Разбив область падения прямой ударной волны на треугольники (рис. 3), определим, какие точки преграды лежат в данной области. Затем определим расстояния от точки разряда до найденных точек преграды.

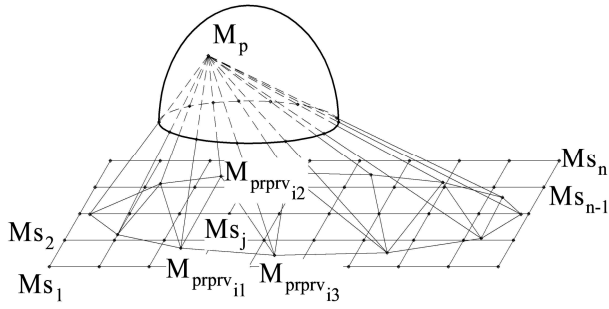


Рис. 3. Схема определения точек преграды, лежащих в области действия прямой ударной волны:

$M_{prgv_{i1}}(X_{prgv_{i1}}, Y_{prgv_{i1}}, Z_{prgv_{i1}})$, $M_{prgv_{i2}}(X_{prgv_{i2}}, Y_{prgv_{i2}}, Z_{prgv_{i2}})$, $M_{prgv_{i3}}(X_{prgv_{i3}}, Y_{prgv_{i3}}, Z_{prgv_{i3}})$ – точки i -го треугольника, составляющего некоторую часть области действия прямой ударной волны

Определение давления, создаваемого прямой ударной волной во всех точках преграды выполняется по формулам (2) [6].

– при $a_m < l_{prv} \leq 2,5 \cdot l_i \dot{y}$

$$P_{prj} = \frac{0,16 \cdot A^4 \cdot \rho_0^8 \cdot U_0^4 \cdot C^8}{\sqrt{l_{prv}} \cdot l_i^8 \dot{y} \cdot L^2}; \quad (2)$$

– и ÷è $2,5 \cdot l_i \dot{y} < l_{prv} \leq 5,5 \cdot l_i \dot{y}$

$$P_{prj} = \frac{0,2 \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \frac{l_{prv}}{l_i \dot{y}}\right) \cdot A^4 \cdot \rho_0^8 \cdot U_0^4 \cdot C^8}{\sqrt{l_{prv}} \cdot l_i^8 \dot{y} \cdot L^2};$$

– и ÷è $l_{prv} > 5,5 \cdot l_i \dot{y}$

$$P_{prj} = \frac{0,26 \cdot A^4 \cdot \rho_0^8 \cdot U_0^4 \cdot C^8 \cdot l_i^2 \dot{y}}{l_{prv}^{1,13} \cdot L^2},$$

где a_m – радиус канала разряда;

l_{prv} – расстояние, которое преодолела ударная волна от точки разряда до точки пересечения с преградой;

$l_{мэ}$ – межэлектродное расстояние;

P_{prj} – максимальное давление на фронте ударной волны;

A – искровая постоянная;

ρ_0 – плотность передающей среды;

U_0 – начальное напряжение заряда конденсаторной батареи;

C – емкость конденсаторной батареи;

L – индуктивность разрядного контура.

Таким образом, следуя данному алгоритму можно определить давление прямых ударных волн на плоской преграде под разрядными камерами

различной сложной формы с «плавающим» (не фиксированным) расположением точки разряда в полости камеры.

Следующей целью расчета является определение полей давления, создаваемых на плоской преграде ударными волнами, отраженными от поверхности камеры. На рис. 4 показана схема распространения ударной волны, отраженной от элементарного конечного участка отражающей поверхности разрядной камеры. Для получения полной картины перемещения отраженной ударной волны, необходимо выполнить расчет для всех участков отражающей поверхности.

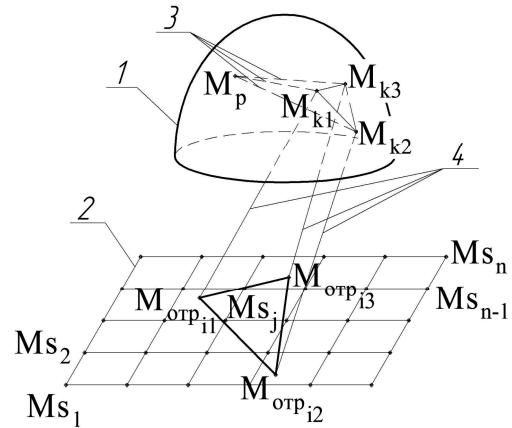


Рис. 4. Схема распространения отраженной ударной волны:

- 1 – отражающая поверхность разрядной камеры;
 - 2 – плоскость преграды; 3 – отрезки, определяющие направление распространения прямой ударной волны; 4 – отрезки, определяющие направление распространения отраженной ударной волны
- M_p – точка разряда; M_{k1} , M_{k2} , M_{k3} – точки k -го треугольника, аппроксимирующего отражающую поверхность разрядной камеры; $M_{отр_{i1}}$, $M_{отр_{i2}}$, $M_{отр_{i3}}$ – точки i -го треугольника, созданного на преграде ударными волнами, отраженными от k -го треугольника отражающей поверхности разрядной камеры

Алгоритм расчета следующий.

1. Определяем направляющие координаты плоскостей треугольников, аппроксимирующих отражающую поверхность.

2. Определяем направляющие векторы прямых, перпендикулярных к треугольникам, аппроксимирующим отражающую поверхность.

3. Определяем направляющие векторы прямых, описывающих движение ударной волны от точки разряда до отражающей поверхности.

4. Из точки разряда опустим перпендикуляры на прямые, проходящие через вершины треугольников, аппроксимирующих отражающую поверхность, перпендикулярно к их плоскостям, и определим точки их пересечения.

5. На следующем этапе необходимо определить опорные точки и направляющие векторы прямых, описывающих распространение ударной волны после отражения от плоскостей треугольников, аппроксимирующих отражающую поверхность.

6. Далее определяем расположение точки пересечения отраженной прямой (проверка на второе отражение): если прямая пересекает один из треугольников, аппроксимирующих отражающую поверхность разрядной камеры, то при дальнейшем ее пересечении с плоскостью преграды принимаем давление на фронте ударной волны, соответствующей данной прямой, равным нулю. Если же отраженная прямая пересекает преграду без предыдущих пересечений с поверхностью разрядной камеры, то на следующем шаге определяем путь, пройденный отраженной ударной волной и по формулам (2) вычисляем давление на ее фронте в месте пересечения с преградой.

7. При пересечении с плоскостью преграды ударная волна, отраженная от элементарного треугольника, аппроксимирующего отражающую поверхность разрядной камеры, также создает проекцию треугольника. Далее определяем, какие точки преграды попали в данную проекцию. Далее по формуле (3) определяем давление, создаваемое отраженной ударной волной на ограниченные проекцией точки преграды.

$$P_{отрj} = \frac{P_{отрк1} + P_{отрк2} + P_{отрк3}}{3}, \quad (3)$$

где $P_{отрj}$ – давление, создаваемое отраженной ударной волной в j -й точке плоскости преграды;

$P_{отрк1}, P_{отрк2}, P_{отрк3}$ – давление, создаваемое отраженной ударной волной в вершинах проекции k -го треугольника, аппроксимирующего отражающую поверхность разрядной камеры.

Если точка на преграде попадает в несколько проекций аппроксимирующих треугольников, то давление отраженной ударной волны определяется алгебраическим суммированием средних давлений в данных проекциях.

8. По рекомендации работы [7] по формуле (4) вычислим полное давление на преграде.

$$P_{maxj} = P_{прj} + 0,6 \cdot P_{отрj}, \quad (4)$$

где P_{maxj} – полное давление в j -й точке плоскости преграды.

Далее по известным координатам точек преграды и вычисленным значениям полного давления в данных точках строим карты полей нагружения ударными волнами при заданных параметрах разряда и геометрических характеристик отражающей поверхности разрядной камеры.

3. Пути совершенствования созданной расчетной модели

Как было указано во введении, основное отличие камер взрывных прессов от разрядных камер электрогидравлических прессов состоит в наличии в разрядных камерах электродов, создающих препятствия свободному распространению ударных волн в полости камеры. Поэтому модель расчета полей нагружения ударными волнами должна учитывать данный фактор. Учет наличия электродов должен производиться как при расчете прямых ударных волн, так и на этапе расчета отраженных ударных волн.

Как известно, прижимные кольца при ЭГШ также могут оказывать влияние на распределение ударных волн в разрядной камере. Так, при правильном профилировании, отражающая поверхность прижимного кольца способна концентрировать ударные волны, направляя их на заготовку, тогда как неправильное профилирование рассеивает как прямые, так и отраженные ударные волны. Таким образом, еще одним путем совершенствования расчетной модели является проведение расчета с учетом наличия отражающей поверхности прижимного кольца.

Одним из допущений, принятых в рассмотренной модели, является одновременность прихода прямых и отраженных ударных волн к плоскости преграды, а неравномерность учитывается введением коэффициента 0,6 в выражении (4). Однако это вносит существенную погрешность в расчет давления. Поэтому в расчетной модели следует учитывать разновременность воздействия прямой и отраженной ударных волн, что увеличит точность расчета максимального давления на заготовку.

При выполнении калибровки глубоких деталей, чеканке мелких радиусов либо вырубке отверстий на дне или боковых стенках детали необходимо создать интенсивное и равномерное поле нагружения ударными волнами для качественного формообразования данных конструктивных элементов. Следовательно, определение модели расчета полей давления для такого класса деталей также является важной научно-практической задачей.

Заключение

Таким образом, разработана математическая модель распространения ударных волн в разрядных камерах с различной формой отражающей поверхности при возможности задания точки разряда в любом месте полости камеры, а также определены алгоритмы расчета полей давлений, создаваемых прямыми и отраженными ударными волнами. Наме-

чены пути совершенствования разработанной модели, в частности, определения распространения ударных волн в полости разрядной камеры с учетом наличия электродов.

Литература

1. 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.

2. 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. – Х.: Харьк. авиац. ин-т., 1980. – Вып. 8. – С. 129-132.

3. 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. – 1982. – № 8. – С. 120-125.

4. Генкин Б.С. К расчету разрядных камер для электрогидравлической штамповки / Б.С. Генкин, А.Ю. Святенко, Л.Г. Костин // Высокоскоростная обработка материалов давлением. – 1982. – № 8. – С. 118-120.

5. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров): пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

6. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта: [монография] / Г.А. Гульи [и др.]; под ред. Г.А. Гулого. – М.: Машиностроение, 1977. – 320 с.

7. Чачин В.Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов: монография / В.Н. Чачин. – Мн.: Наука и техника, 1978. – 184 с.

Поступила в редакцию 29.05.2010

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

ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ УДАРНИХ ХВИЛЬ В РОЗРЯДНИХ КАМЕРАХ ЕЛЕКТРОГІДРОІМПУЛЬСНИХ ПРЕСІВ

Я.С. Жовноватюк

Розглянуто дослідження з моделювання навантаження заготовки ударними хвилями в розрядних камерах простої форми електрогідроімпульсних пресів. Встановлено вихідні дані для розрахунку полів навантажень заготовки прямими та відбитими ударними хвилями та вказано основні допущення, що прийнято при розрахунку. Представлено розрахункові схеми та основні математичні залежності для визначення шляхів розповсюдження ударних хвиль в розрядних камерах різного профілю з різним розміщенням точки розряду в порожнині камери. Вибрано розрахункові формули визначення максимального тиску на заготовці під час дії ударних хвиль. Намічено шляхи вдосконалення розрахункової моделі.

Ключові слова: розрядна камера, прямі та відбиті ударні хвилі, поле навантаження.

ON THE ISSUE OF MODELING OF SHOCK WAVES DISTRIBUTION IN DISCHARGE CHAMBERS OF ELECTROHYDROIMPULSE PRESSES

Ya.S. Zhovnovatyuk

Researches in modeling of blank loading by shock waves in simple-shaped discharge chambers of electrohydroimpulse presses were considered. Source data for calculation of load fields on blank by direct and mirrored shock waves was established and calculation main assumptions were pointed out. Calculation schemes and main mathematical dependencies for shock waves distribution paths determination in different shapes discharge chambers with different discharge point location in chamber cavity were presented. Calculation formulas for determination of maximum pressure on blank by shock waves impact were selected. Paths of calculation pattern improvement were denoted.

Key words: discharge chamber, direct and mirrored shock waves, load field.

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