

УДК 533.6.011

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПЛАСТИНУ В ЗАМКНУТОЙ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ

В. М. КОСЕНКОВ, Л. А. КАМЕНСКАЯ, Н. В. СТАРКОВ

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

Получено 22.02.2005

Выполнено теоретическое исследование пространственно-временного поля давления, возникающего в результате электрического разряда в объеме воды, ограниченном жесткими стенками. Определены характеристики волны давления, действующей на поверхность пластины, помещенной в заданной части резервуара, и их связь с параметрами электрического разряда.

Виконано теоретичне дослідження просторово-часового поля тиску, яке виникає внаслідок електричного розряду в об'ємі води, обмеженому жорсткими стінками. Визначені характеристики хвилі тиску, яка діє на поверхню пластины, розміщеної у заданій частині резервуара, і їх зв'язок з параметрами електричного розряду.

A space-time pressure field generated as a result of electric discharge in water volume limited by hard walls is theoretically investigated. The characteristics of pressure wave acting on the surface of the plate placed in a specified part of the reservoir and their relations with parameters of the electric discharge are determined.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий и его сплавы, применяющиеся на практике в качестве конструкционных материалов немногим более ста лет, в настоящее время уступают по распространенности лишь стали [1]. Этому способствует ряд благоприятных свойств указанных материалов, имеющих особое значение во многих областях техники. Их использование неразрывно связано с процессом штамповки как наиболее экономичным и высокопроизводительным методом холодной обработки металла. В свою очередь, этот процесс обработки ограничен в своем применении относительно низкими пластическими свойствами высокопрочных алюминиевых сплавов.

С появлением высокоскоростных взрывных, магнитно-импульсных, электрогидроимпульсных и других методов штамповки обнаружены некоторые особенности импульсного деформирования высокопрочных алюминиевых сплавов. В частности, установлено, что вместе со скоростью деформирования увеличиваются пределы прочности и текучести материала [1, 2]. В результате исследований отмечено, что в металле возможно одновременное протекание процессов упрочнения и разупрочнения, а также сделан вывод о том, что электрогидравлическая обработка высокопрочных алюминиевых сплавов, ускоряя процессы старения, увеличивает пластичность материала при одновременном возрастании твердости и прочности.

Для выяснения причин такого поведения высоко-

прочных алюминиевых сплавов необходимо определить связь между характеристиками действующей на пластину из этого материала волны давления и параметрами электрического разряда, генерирующего волну давления.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Описание процессов распространения гидродинамических волн и определение давления жидкости на пластину, помещенную в разрядную камеру, проводилось с использованием допущения о безвихревом характере течения идеальной сжимаемой жидкости, оправданного при электрических разрядах в воде. Такой подход значительно упрощает алгоритм, позволяя свести решение задачи к одному нелинейному уравнению относительно потенциала скорости [3].

На рис. 1 приведен эскиз разрядной камеры, размеры которой использованы в расчетах. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – электроды, 2 – исследуемая пластина. В построении алгоритма расчета распространения в замкнутом объеме гидродинамических волн, образующихся при электрогидравлическом разряде в воде [3], используются допущения, согласно которым:

- среда в канале разряда полагается идеальной плазмой, плотность и давление которой однородны во всем объеме канала;
- канал разряда в начальный момент представляет собой круговой цилиндр с длиной, равной межразрядному промежутку;

- жидкость, окружающая канал разряда идеальная сжимаемая, а ее движение потенциально.

С учетом сделанных допущений, кинематика и динамика жидкости в замкнутом объеме описывается уравнениями движения:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla (\vec{v} \cdot \vec{v}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (1)$$

неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{v} + \vec{v} \nabla \rho = 0, \quad (2)$$

и состояния

$$\frac{p + B}{p_0 + B} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\kappa, \quad (3)$$

где \vec{v} – вектор скорости жидкости; p , ρ – давление и плотность жидкости в текущий момент времени; p_0 – гидростатическое давление; ρ_0 – плотность невозмущенной жидкости. Для воды $\rho_0 = 103 \text{ кг/м}^3$; B , κ – константы, определенные при p_0 , ρ_0 : $B = 3.044 \cdot 10^8 \text{ Па}$, $\kappa = 7.15$.

Система уравнений (1)–(3) дополняется граничными условиями равенства давлений и нормальных составляющих скоростей на внутренней границе расчетной области (контактном разрыве плазма – вода):

$$p = p_k, \quad \vec{v} \cdot \vec{n} = \vec{W} \cdot \vec{n},$$

а также условием непротекания на внешних границах (неподвижных жестких стенках камеры):

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0.$$

Здесь p_k – давление в канале разряда; \vec{n} – орт внешней нормали к границе; \vec{W} – вектор скорости границы плазма – вода.

Вводится функция потенциала ψ скорости жидкости ($\vec{v} = \nabla \psi$), начальные условия для которой будут нулевыми:

$$\psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0, \quad t = 0.$$

Уравнение движения жидкости в потенциальном приближении имеет вид

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = a^2 \nabla^2 \psi - \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \psi)^2, \quad (4)$$

$$a^2 = a_0^2 - (\kappa - 1) \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{1}{2} (\kappa + 1) (\nabla \psi)^2,$$

где a_0 – скорость звука в невозмущенной жидкости; t – текущее значение времени. Давление в

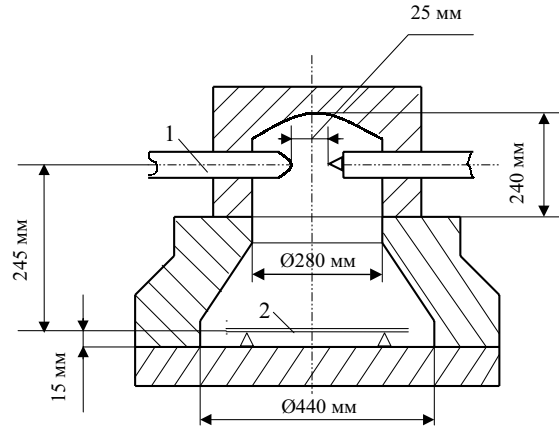


Рис. 1. Эскиз разрядной камеры

жидкости через производные потенциала выражается следующим образом:

$$p = -B + (p_0 + B) \left\{ 1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{\rho_0}{p_0 + B} \times \left[\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \psi)^2 \right] \right\}^{\kappa / (\kappa - 1)}. \quad (5)$$

Связь между параметрами в канале разряда устанавливается уравнением баланса энергии [4]:

$$\frac{1}{\gamma - 1} \frac{d(p_k V_k)}{dt} + p_k \frac{dV_k}{dt} = N(t), \quad (6)$$

где V_k – объем канала разряда; $\gamma = 1.26$ – постоянная величина; $N(t)$ – закон ввода энергии в канал разряда. Зависимость $N(t)$ в работе [5] предлагается аппроксимировать равнобедренным треугольником. При этом энергия, введенная за время первого полупериода колебаний тока, вычисляется по исходным данным электрической цепи (C , L , U_0) с учетом длины разрядного промежутка в камере и значения искровой постоянной для разрядов, инициируемых высоким напряжением, равным 10^4 В/см .

Кроме того, также не учитывалось горизонтальное расположение электродов, а задача решалась в осесимметричном приближении. Такое упрощение оправдано тем, что длина разрядного промежутка в камере мала по сравнению с размерами самой камеры.

В принятой постановке задачи описание процессов, проходящих в разрядной камере, сводится к определению потенциала скорости ψ (4), давления в канале разряда p_k , его объема V_k (6) и давления в жидкости p (5) как функций пространственной

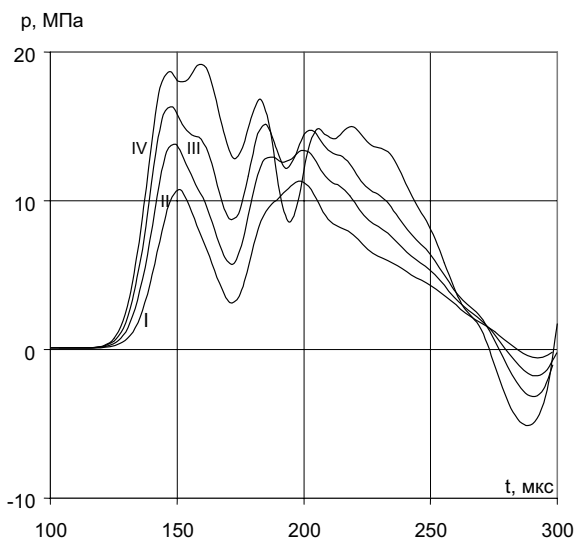


Рис. 2. Изменение давления во времени для режимов I, II, III, IV

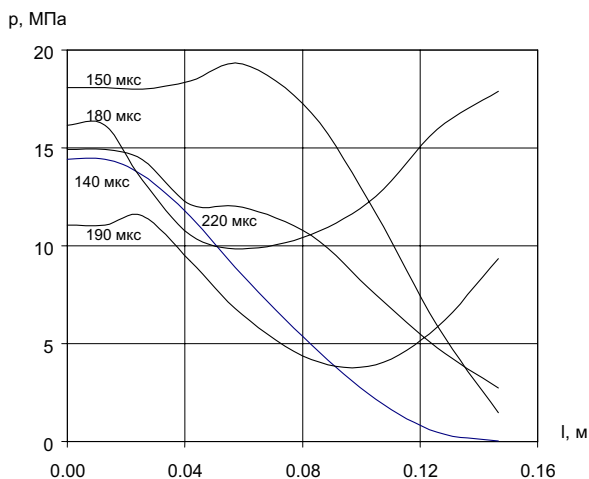


Рис. 3. Распределение давления по длине пластины

координаты и времени. Алгоритм решения данной задачи изложен в работе [3].

Оценки величины прогиба пластины 2 (рис. 1) получены исходя из уравнения движения пластины без учета мембранных напряжений. Для расчета использована следующая зависимость:

$$\rho \ddot{S}_0 = p(t), \tag{7}$$

где S_0 – исходная толщина пластины; x – прогиб пластины, направленный по нормали к ней; ρ – плотность материала пластины; $p_{пл}(t)$ – закон изменения давления на пластину во времени с учетом дифракции на пластине.

Интегрированием уравнения (7) по x и по t получена зависимость для определения прогиба:

$$\rho S_0 x = \int_0^t J dt. \tag{8}$$

Здесь J – импульс давления за время t , равный

$$J = \int_0^t P(t) dt.$$

Величина прогиба пластины от действия гидродинамической нагрузки в течение времени t составляет

$$x = \frac{1}{\rho S_0} \int_0^t J dt. \tag{9}$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты волновых процессов в разрядной камере проводились для четырех режимов электрического разряда с заданными значениями параметров. Для всех режимов постоянными были напряжение батареи конденсаторов $U_0 = 45$ кВ и индуктивность разрядной цепи $L = 10$ мкГн. Емкость батареи составляла для I, II, III и IV режимов соответственно 1, 2, 3 и 4 мкФ.

В процессе выполненных расчетов были определены величины давления $p_{пл}$ воды на пластину (5) толщиной 1 мм и сделана оценка возможного ее прогиба x (9).

Результаты гидродинамических расчетов приведены на рис. 2–6. Зависимость давления жидкости на пластину от времени показана на рис. 2. Точка наблюдения находится на оси разрядной камеры на расстоянии 23 см от электродов. Кривые давления приведены для четырех режимов электрического разряда, описанных выше и различающихся между собой величиной энергии, вводимой в канал разряда. Энергия увеличивается от режима I к режиму IV. В соответствии с этим изменяется амплитуда в первой волне давления, подошедшей к пластине. Наибольшее давление падающей волны меняется в пределах от 11 МПа для режима I до 18 МПа для режима IV. Второй максимум на кривых соответствует приходу возмущения от дна камеры; величина его или сравнима с первым (кривые I, II) или меньше его приблизительно на 10 % (кривые III, IV). Для более мощных разрядов – III, IV – наблюдается и третий максимум, что обусловлено сложной формой разрядной

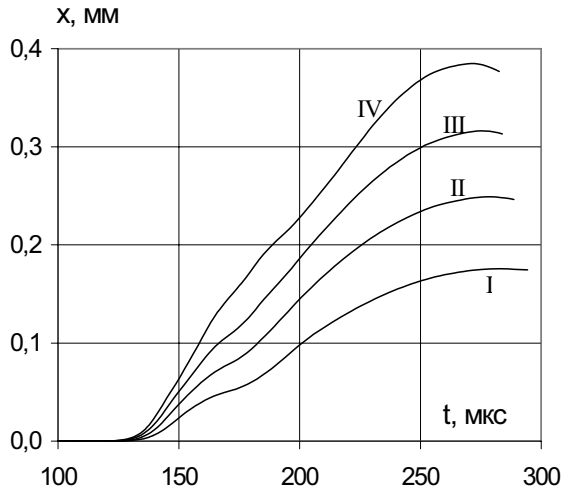


Рис. 4. Величины прогиба в середине длины пластины для режимов I, II, III, IV

камеры и увеличением длительности ввода энергии в канал разряда. Основной импульс волна давления сообщает пластине в течение первых 120 мкс от прихода к ней, что соответствует первому периоду изменения давления (см. рис. 2). В последующие периоды амплитуды давления уже сравнительно невелики, поэтому невелик и их вклад в импульс, сообщаемый пластине. На рис. 3 представлено распределение давления по длине пластины l для нескольких моментов времени, соответствующих наиболее интенсивному действию на пластину падающей волны. Начало координат по оси абсцисс совпадает с осью симметрии разрядной камеры. Кривые на рис. 3 соответствуют режиму IV. Из них следует, что наибольшее давление действует на центральный участок пластины длиной $l = 80$ мм. Результаты оценочных расчетов прогиба в сечении пластины, расположенном на оси симметрии камеры, приведены на рис. 4.

Результаты математического моделирования действия волны давления на пластину свидетельствуют, что величина ее прогиба относительно невелика и не приводит к существенному изменению продольных деформаций. До прихода волны давления пластина находится в одноосном состоянии с напряжениями, близкими к пределу текучести материала. Действие волны давления переводит пластину из одноосного в трехосное напряженное состояние благодаря ее боковому обжатю, и вызывает появление напряжений, которые могут превысить предел текучести. При таких условиях волна давления относительно небольшой амплитуды может создавать остаточные деформации в

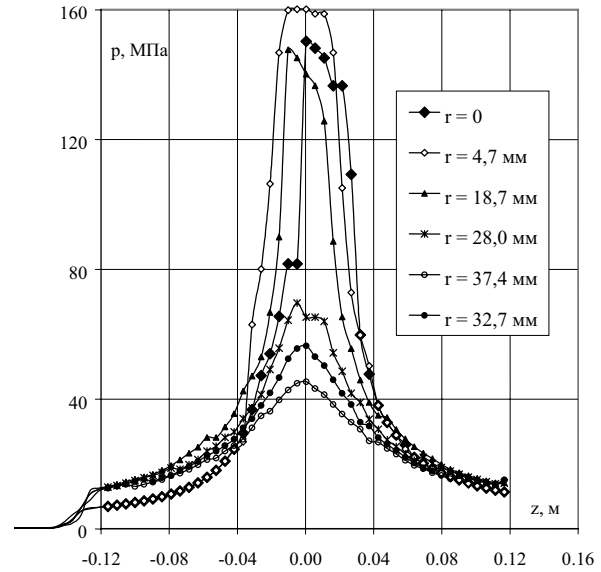


Рис. 5. Максимальное давление на различных расстояниях от оси камеры (r)

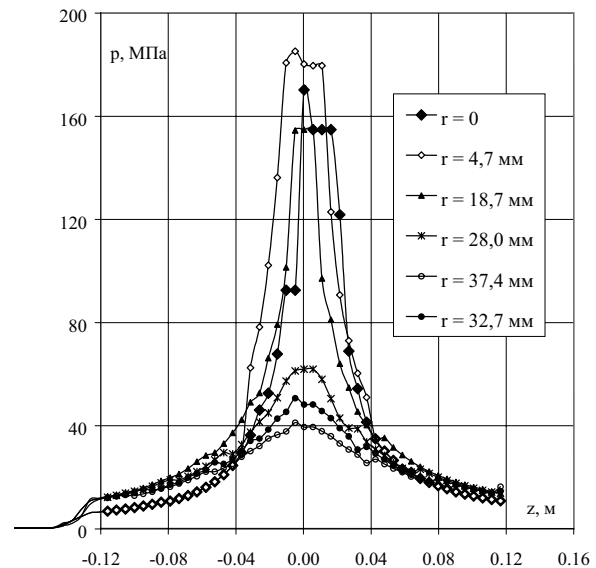


Рис. 6. Максимальное давление на различных расстояниях от оси камеры (r)

пластине.

Для определения зависимости остаточных изменений в материале образцов от параметров подводного электрического разряда и излучаемой им волны сжатия выполнены расчеты распределения максимального давления жидкости в разрядной камере. Результаты расчетов представлены на рис. 5 и 6 ($U_0 = 45$ кВ, $L = 10$ мкГн при $C = 16$

и 3.6 мкФ, соответственно). С их помощью можно определить максимальное давление в различных точках разрядной камеры (в том числе там, где располагается испытываемый образец) и установить связь между параметрами электрического разряда, давлением жидкости на пластину и остаточными изменениями в материале.

ВЫВОДЫ

1. В области значений параметров электрического разряда в замкнутой камере ($U_0 = 45$ кВ, $L = 10$ мкГн и $C_0 = 1 \div 4$ мкФ), типичных для выполнения операций штамповки деталей из листовых материалов, давление на образцы материалов характеризуется большой неравномерностью. Максимальное давление распределено относительно равномерно только вблизи оси симметрии разрядной камеры: в радиусе 20 мм от нее (10 % от наибольшего радиуса разрядной камеры).
2. На расстоянии от оси симметрии камеры, превышающем 50 % наибольшего

ее радиуса, максимальное давление мало зависит от параметров электрического разряда и расстояния от канала разряда.

3. Время основного действия волны давления составляет приблизительно 100 мкс и практически не зависит от параметров электрического разряда.

1. Чачин В. Н., Богоявленский К. Н., Варин В. А. и др. Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении. – Минск: Наука и техника, 1987. – 231 с.
2. Алюминий. Свойства и физическое металловедение. Справочник / Под ред. Дж. Е. Хэтча. – М.: Металлургия, 1989. – 421 с.
3. Косенков В. М., Каменская Л. А. Расчет расширения канала электрического разряда в жидкости, описываемой в потенциальном приближении // Акуст. вісн. – 2001. – 4, N 2. – С. 47–52.
4. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 155 с.
5. Барбашова Г. А., Иванов А. В., Каменская Л. А. Исследование давления жидкости в жесткой камере при подводном искровом разряде // Гидромеханика. – 1987. – 56. – С. 16–20.