

# ЗАВИСИМОСТЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА МЕТАЕМУЮ ПЛАСТИНУ ОТ ИНДУКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ СВАРКЕ ДВУХ ПЛАСТИН ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ УДАРОМ

Г.А. Барбашова

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, [dpte@iipr.com.ua](mailto:dpte@iipr.com.ua)*

Численно исследуется влияние индуктивности электрической цепи на гидродинамические процессы при сварке двух пластин высокоскоростным ударом. Установлена аналитическая зависимость амплитуды электрической мощности и амплитуды силы давления от индуктивности.

УДК 532.6.011

## ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] приведены некоторые результаты исследования гидродинамических процессов, имеющих место при сварке двух пластин высокоскоростным ударом (ВСУ). Эта разрядно-импульсная технология разработана в ИИПТ НАН Украины [2] и состоит в следующем. В толстостенную втулку с двумя отверстиями по торцам помещается цилиндрический полиэтиленовый электровзрывной патрон, заполненный водой и содержащий взрывающийся проводник – спиралевидную алюминиевую проволоку. Одно из оснований патрона закрыто полиэтиленом, к другому прикрепляется метаемая пластина. Под воздействием гидродинамической нагрузки, образующейся в результате электрического взрыва проводника, метаемая пластина перемещается до своего соударения со второй, неподвижной пластиной. Результаты вычислительного эксперимента показали, в частности, следующее [1]. Фронт волны сжатия, генерируемой образующимся при взрыве проводника плазменным каналом, достигает различных участков поверхности метаемой пластины практически в одно и то же время, а гидродинамическая нагрузка равномерно распределяется по поверхности пластины. Происходит истечение жидкости из первоначально занимаемого объёма со значительными скоростями. Жидкость разрушается – образуются «отколы». На качество сварного соединения влияют величина действующей на метаемую пластину нагрузки, скорость движения пластины в момент соударения с неподвижной, угол между пластинами и другие факторы [3]. Определение степени их влияния на процесс сварки и качество сварного соединения актуально при разработке соответствующей разрядно-импульсной технологии.

Экспериментально установлено [2], что наибольший эффект при сварке ВСУ медной (метаемая) и стальной пластин достигается при запасаемой энергии  $E_0 = 10$  кДж, когда толщина медной пластины  $h = 1$  мм и  $E_0 = 12,5$  кДж при  $h = 2$  мм. Толщина неподвижной стальной пластины равна 4 мм.

Цель настоящей работы – установление зависимости действующей на метаемую пластину гидродинамической нагрузки от величины индуктивности электрической цепи при указанных выше значениях запасаемой энергии и толщины метаемой пластины.

## ПОСТАНОВКА И СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

При построении математической модели полагали, что стенка держащей патрон втулки абсолютно жёсткая; проводник находится на оси симметрии патрона и имеет форму прямого кругового цилиндра конечной длины, объём которого равен объёму спиралевидного проводника; метаемая пластина имеет форму диска, не деформируется и перемещается по закону движения твёрдого тела; патрон заполнен идеальной сжимаемой жидкостью, а канал разряда – идеальной низкотемпературной плазмой.

Математическая модель, описывающая гидродинамические процессы при сварке двух пластин ВСУ, включает в себя систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, записанную в цилиндрической системе координат [4]; уравнение состояния в двучленной форме [4]; уравнение баланса энергии в канале разряда [5] на контактном разрыве плазма – вода; условие непротекания на неподвижной жёсткой поверхности [4]; условие на свободной поверхности [4] на том основании

патрона, где жидкость в начальный момент ограничена полиэтиленом, и на границе вода – газ вытекающей жидкости на противоположном торце; равенство скорости движения границы жидкость – пластина скорости перемещения пластины, определяемой из уравнения движения твёрдого тела:

$$m \cdot \ddot{x} = F = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^R r \cdot (p - p_0) dr, \quad (1)$$

где  $x$  – перемещение пластины;  $m$  – её масса;  $r$  – координата точки на пластине;  $F$  – действующая на неё сила гидродинамического давления;  $R$  – радиус пластины;  $p, p_0$  – давление жидкости и воздуха на пластину.

В начальный момент параметры жидкости равны своим значениям в невозмущенной среде при атмосферном давлении.

Задача решалась конечно-разностным методом Годунова [4]. Использовалась подвижная сетка. При решении задачи учитывалась область, занимаемая вытекающей водой вблизи пластины.

Уравнение (1) переписывалось в виде

$$m \cdot \ddot{x} \approx 2 \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^n \left[ (p_i - p_0) \cdot \frac{r_{i+1}^2 - r_i^2}{2} \right] = \pi \cdot \sum_{i=1}^n \left[ (p_i - p_0) \cdot (r_{i+1}^2 - r_i^2) \right], \quad (2)$$

где  $n$  – число участков разбиения по радиусу пластины;  $p_i$  – давление жидкости на участке  $[r_i; r_{i+1}]$ .

Дифференциальное уравнение (2) решалось с помощью явной конечноразностной схемы второго порядка точности.

В настоящей работе при решении задачи полагали, что запасаемая энергия  $E_0 = 10$  кДж при  $h = 1$  мм или  $E_0 = 12,5$  кДж ( $h = 2$  мм), а зарядное напряжение  $U_0 = 50$  кВ. Рассматривали лишь моноимпульсные (апериодические) разряды. В этом случае доля запасаемой энергии  $\eta$ , выделившейся в течение первого полупериода разряда, приближённо равна единице, а энергия, введённая в течение первого полупериода разряда, равна запасённой энергии.

Длительность первого полупериода разряда  $\tau$  и введённая за это время энергия  $E$  определялись по формулам [6]:

$$\tau = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C} \cdot (1 + \eta^3) = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}, \quad (3)$$

$$E = 0,5 \cdot C \cdot U_0^2 \cdot \eta = E_0, \quad (4)$$

где  $C$  – ёмкость конденсаторной батареи,  $L$  – индуктивность разрядного контура.

Величину ёмкости вычисляли по формуле  $C = 2 \cdot E_0 / U_0^2$  ( $C = 8$  мкФ при  $h = 1$  мм и  $C = 10$  мкФ при  $h = 2$  мм), а величину индуктивности  $L$  изменяли от 1 до 8 мкГн.

Закон ввода электрической мощности в канал разряда задавался следующим образом [5]:

$$N(t) = \begin{cases} 4 \cdot t \cdot E / \tau^2, & 0 \leq t \leq \tau / 2, \\ 4 \cdot (1 - t / \tau) \cdot E / \tau, & \tau / 2 \leq t \leq \tau, \\ 0, & \tau < t. \end{cases} \quad (5)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Схема расчётной области приведена на рис. 1 статьи [1].

Для проверки адекватности математической модели реальному процессу была решена задача с законом ввода электрической мощности  $N(t)$ , определённым по измеренным в ходе эксперимента разрядному току и напряжению на канале разряда (рис. 2 статьи [1]). В этом случае в качестве метаэмого тела использовался образец массы  $m = 21$  г. Полученную зависимость перемещения образца от времени сравнивали с такой же зависимостью, которую получили В.Д. Половинка и Р.В. Тертилов в ходе фоторегистрации перемещения образца. Результаты натурального (кривая 1) и вычислительного экспериментов (кривая 2) приведены на рис. 1. Кривая 3 здесь характеризует перемещение тела в бесконечно длинной трубе [7]. Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что сначала расхождение расчётных

и экспериментальных данных незначительно, но со временем расстояние между кривыми растёт, что следует объяснить погрешностями эксперимента и математической модели. Когда расчётное перемещение пластины  $x \approx 10$  мм, кривые разнятся примерно на 40%. То есть использование данной математической модели для описания гидродинамических процессов при сварке ВСУ вполне оправданно, если расстояние между свариваемыми пластинами составляет менее 10 мм. Различие между кривыми 1 и 3 более значительно, поскольку математическая модель [7] не учитывает истечение жидкости из трубы.

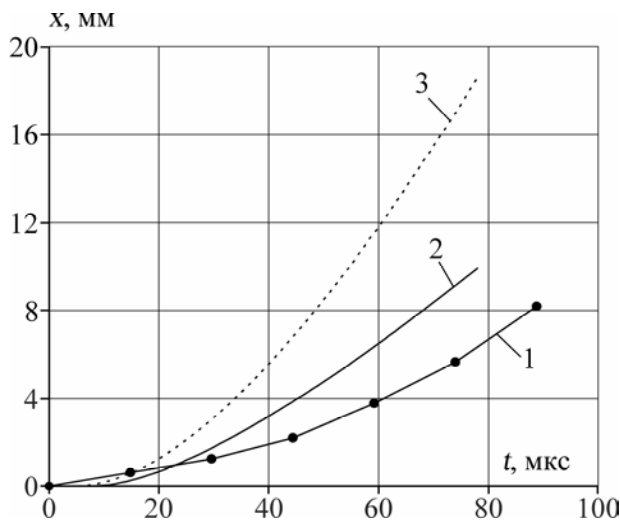


Рис. 1. Перемещение метаемого образца: 1 – экспериментальные данные; 2 – расчётные данные (математическая модель настоящей работы); 3 – расчётные данные (математическая модель работы [7])

Приведём некоторые результаты решения задачи с законом ввода электрической мощности (5). Задача решалась для метаемой пластины радиуса  $R = 10$  мм и толщины  $h = 1$  мм и  $h = 2$  мм. В первом случае масса пластины  $m = 2,8$  г, во втором –  $m = 5,6$  г. Расстояние между пластинами в начальный момент времени равнялось 6 мм.

При увеличении индуктивности электрической цепи возрастает длительность первого полу-периода разряда и, поскольку запасаемая энергия постоянна, уменьшается амплитуда электрической мощности (рис. 2). Как следствие – уменьшается амплитуда давления в канале разряда и в окружающей его жидкости. Но увеличение продолжительности времени ввода энергии в канал разряда приводит к уменьшению скорости спада давления после достижения им максимального значения. Сказанное относится и к давлению жидкости (то есть к гидродинамической нагрузке) на метаемую пластину. Характер нагружения пластины меняется (рис. 3). Но суммарная нагрузка за рассматриваемый период времени (до момента соударения двух пластин) при увеличении индуктивности уменьшается. Поэтому уменьшается и скорость движения метаемой пластины.

Приведенные на рис. 2–3 данные соответствуют  $h = 1$  мм. При  $h = 2$  мм рассмотренные характеристики процесса ведут себя аналогично.

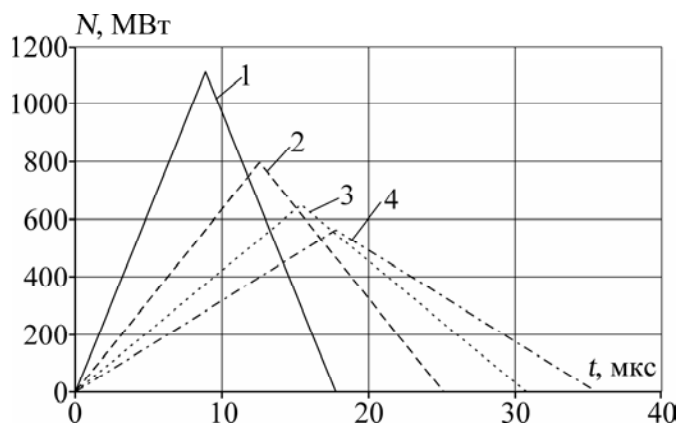


Рис. 2. Вводимая в канал разряда электрическая мощность при  $L$ , мкГн: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

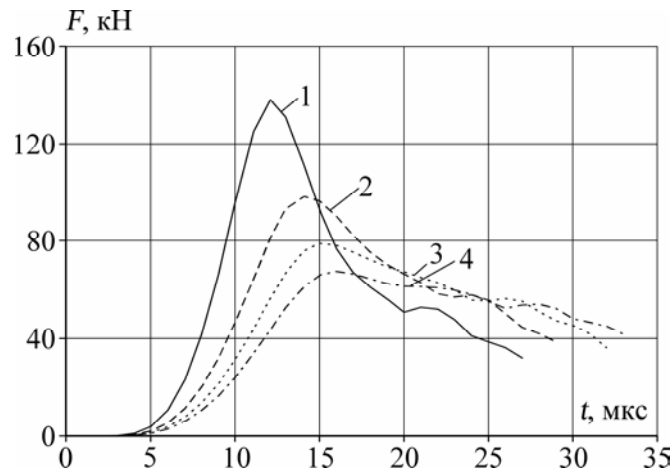


Рис. 3. Гидродинамическая нагрузка на метаемую пластину при  $L$ , мкГн: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

Кривая зависимости амплитуды вводимой в канал разряда электрической мощности от величины индуктивности электрической цепи достаточно достоверно аппроксимируется степенной функцией  $N_m(L) = N_{m1} \cdot (L \cdot 10^6)^{-a}$ , где  $N_{m1}$  – амплитуда электрической мощности при  $L = 1$  мкГн,  $a \approx 0,5$  (рис. 4), а кривая зависимости амплитуды гидродинамической нагрузки на метаемую пластину от величины индуктивности – функцией  $F_m(L) = F_{m1} \cdot (L \cdot 10^6)^{-a}$ , где  $F_{m1}$  – амплитуда гидродинамической нагрузки на пластину при  $L = 1$  мкГн,  $a \approx 0,5$  (рис. 5).

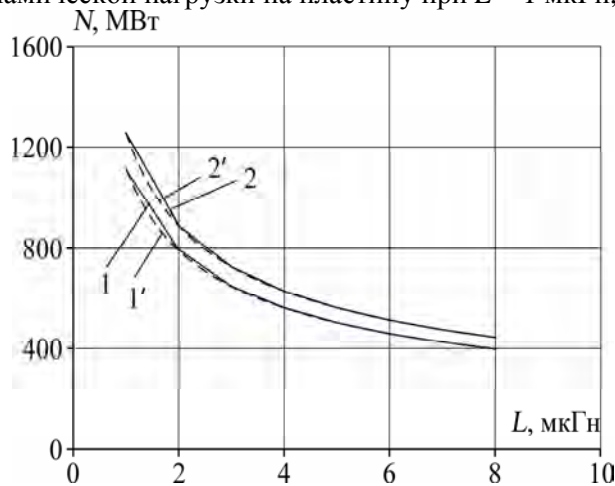


Рис. 4. Зависимость амплитуды электрической мощности от индуктивности разрядной цепи (1, 2) и аппроксимирующие их степенные функции (1', 2'): 1, 1' –  $h = 1$  мм; 2, 2' –  $h = 2$  мм

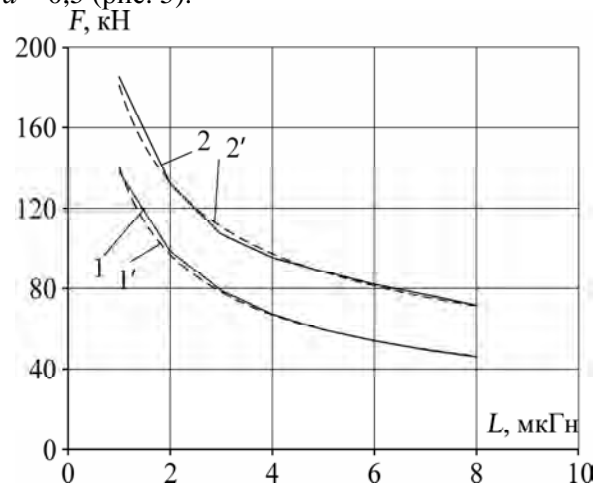


Рис. 5. Зависимость амплитуды силы давления на метаемую пластину от индуктивности разрядной цепи (1, 2) и аппроксимирующие их степенные функции (1', 2'): 1, 1' –  $h = 1$  мм; 2, 2' –  $h = 2$  мм

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используемая математическая модель удовлетворительно описывает гидродинамические процессы при сварке двух пластин высокоскоростным ударом, если расстояние между пластинами составляет менее 10 мм.

При увеличении индуктивности электрической цепи изменяется характер нагружения метаемой пластины: уменьшаются амплитуда давления и суммарная нагрузка на пластину. Вследствие этого падает скорость перемещения метаемой пластины.

Зависимость амплитуды вводимой в канал разряда электрической мощности, как и амплитуды гидродинамической нагрузки на метаемую пластину, от величины индуктивности электрической цепи достаточно достоверно аппроксимируется степенной функцией.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Barbashova G. A. Hydrodynamic Processes in High-Speed Impact Welding of Two Plates. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010, **46**(6), 596–599.

2. Юрченко Е.С., Половинко В.Д., Шленский П.С. Сварка разнородных материалов высокоскоростным ударом с применением электровзрыва проводника. *Тезисы докладов VII Международной школы-семинара «Импульсные процессы в механике сплошных сред»*. Николаев, 2007. 69–70.
3. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 408 с.
4. *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. Под. ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.
5. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 155 с.
6. Иванов В.В., Швец И.С., Иванов А.В. *Подводные искровые разряды*. Киев: Наук. думка, 1982. 192 с.
7. Barbashova G.A. Study of Hydrodynamic Pressure in the Limited Region of a Tube under Explosion of a Microconductor. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009, **45**(1), 38–41.

*Поступила 30.09.11  
После доработки 03.11.11*

### **Summary**

The influence of electrical circuit inductance on hydrodynamic processes by high-speed impact welding of two plates is numerically studied. Analytical dependence of electrical power amplitude and pressure force amplitude from inductance is specified.

---