

PACS: 02.60.Cb, 47.35.+i, 06.60.Vz

Г.А. Барбашова, Л.Ю. Демиденко, В.Д. Половинка, Р.В. Тертилов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ УДАРОМ

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины
пр. Октябрьский, 43а, г. Николаев, 54018, Украина
E-mail: dpte@iipt.com.ua

Статья поступила в редакцию 19 мая 2010 год

Исследована возможность применения математической модели, описывающей гидродинамику электровзрывного патрона, расположенного в трубе бесконечной длины, для изучения процесса сварки двух пластин высокоскоростным ударом (ВСУ). Доказана допустимость использования этой модели при анализе начального периода процесса.

Ключевые слова: математическая модель, высокоскоростной удар, сварка, гидродинамическая нагрузка, скорость перемещения пластины

Введение

При сварке ВСУ пластин из разнородных металлов используется гидродинамическая нагрузка, создаваемая электрическим взрывом проводника в заполненном водой патроне разового действия. Взрыв проводника осуществляется в приспособлении, представляющем собой толстостенную втулку с двумя отверстиями по торцам. Внутри втулки располагается электровзрывной патрон, корпус которого выполнен из полиэтилена. В качестве взрывающегося проводника используется спиралевидная алюминиевая проволока. Такой патрон применяется для запрессовки и сварки труб в трубных решетках теплообменных аппаратов [1]. Метаемая круглая пластина размещается на торцевой части втулки.

Скорость движения метаемой пластины в момент ее соударения с неподвижной является одним из основных динамических параметров, определяющих качество получаемых сварных соединений [2]. Поэтому вопрос определения скорости соударения пластин актуален при разработке технологии сварки металлов ВСУ. Эта скорость, как и напряженно-деформированное состояние свариваемых пластин, зависит от действующей на них гидродинамической нагрузки, массы метаемой пластины, параметров (зазора и угла), определяющих начальную ориентацию свариваемых пластин, и других факторов.

Экспериментальное определение скорости движения метаемой пластины и влияние на нее изменения начальных параметров сварки ВСУ требует проведения многочисленных трудоемких экспериментов ввиду многофакторности процесса. Поэтому целесообразно построение математической модели, позволяющей при помощи численных методов определить изменение скорости метаемой пластины в зависимости от начальных параметров сварки ВСУ.

Для этого используем математическую модель, описывающую гидродинамические процессы в цилиндрическом электровзрывном патроне, применяемом при запрессовке труб [3]. Цель настоящей работы – определение области применимости данной модели при исследовании процесса сварки двух пластин ВСУ.

Постановка задачи и способ ее решения

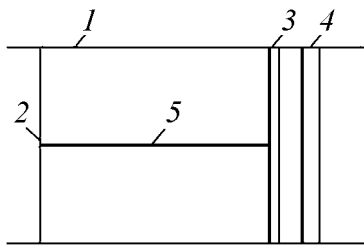


Рис. 1. Принципиальная схема области исследования: 1 – поверхность трубы, 2 – полиэтиленовое дно, 3 – метаемая пластина, 4 – неподвижная пластина, 5 – взрывающийся проводник

Полагаем, что патрон находится в цилиндрической трубе неограниченной длины, боковая поверхность трубы абсолютно жесткая, одно из оснований цилиндрического патрона (дно его корпуса) выполнено из полиэтилена, на другом его торце располагается подвижная жесткая пластина. На оси симметрии цилиндра находится взрывающийся проводник, имеющий форму прямого кругового цилиндра, объем которого равен объему спиралевидного проводника (рис. 1). Патрон заполнен идеальной сжимаемой жидкостью, а образующаяся после взрыва проводника полость (канал разряда) – идеальной низкотемпературной плазмой.

Следуя принятым допущениям, математическую постановку задачи формулируем таким образом. В области жидкости, ограниченной контактной границей вода–плазма (стенка канала разряда), абсолютно жесткой цилиндрической поверхностью (стенка трубы), свободной поверхностью на одном из оснований (там, где жидкость ограничена полиэтиленом) и подвижным жестким диском – на другом, необходимо решить систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, записанную в цилиндрической системе координат [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial(rp)}{\partial t} + \frac{\partial(rpv_z)}{\partial z} + \frac{\partial(rpv_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial(rpv_r)}{\partial t} + \frac{\partial(rpv_z v_r)}{\partial z} + \frac{\partial[r(pv_r^2 + p)]}{\partial r} = p, \\ \frac{\partial(rpv_z)}{\partial t} + \frac{\partial[r(pv_z^2 + p)]}{\partial z} + \frac{\partial(rpv_z v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial(re)}{\partial t} + \frac{\partial[r(e+p)v_z]}{\partial z} + \frac{\partial[r(e+p)v_r]}{\partial r} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Эта система замыкается уравнением состояния в двучленной форме [4]:

$$\varepsilon = \left[p - c_0^2 (\rho - \rho_0) \right] / \left[\rho (k - 1) \right], \quad (2)$$

где t – время; r, z – цилиндрические координаты; v_r, v_z – радиальная и осевая компоненты вектора скорости жидкости; p – давление; ρ – плотность жидкости; $e = \rho \left[\varepsilon + (v_r^2 + v_z^2) / 2 \right]$; ε – удельная внутренняя энергия; ρ_0 – плотность покоящейся жидкости; c_0 – скорость звука в покоящейся жидкости; $k = 7.15$.

На внутренней границе расчетной области (контактном разрыве плазма-вода) требуется выполнение условия баланса энергии [5]:

$$\frac{1}{(\gamma - 1)} \frac{d(p_a V_a)}{dt} + p_a \frac{dV_a}{dt} = N(t), \quad (3)$$

где p_a – давление в канале разряда, V_a – объем канала разряда, $\gamma = 1.26$ – эффективный показатель адиабаты плазмы, $N(t)$ – закон выделения электрической мощности в канале разряда.

На неподвижной жесткой стенке ставится условие непротекания

$$v_n = 0, \quad (4)$$

где v_n – нормальная составляющая вектора скорости жидкости.

На подвижной границе скорость жидкости равна скорости движения пластины, которая перемещается по закону движения абсолютно твердого тела:

$$m\ddot{x} = F = 2\pi \int_0^R r(p - p_0) dr, \quad (5)$$

где x – перемещение пластины, m – ее масса, r – координата точки на пластине, F – действующая на нее сила давления, R – радиус пластины, p_0 – давление воздуха на нее.

На свободной поверхности

$$p = 0. \quad (6)$$

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

Задача (1)–(6) решается конечноразностным методом Годунова [4].

Электрическая мощность в канале разряда (рис. 2) определялась по полученным экспериментально значениям разрядного тока и напряжения на канале.

Анализ полученных результатов

При электрическом взрыве проводника образуется ударная волна, движущаяся к стенке трубы, повышается давление жидкости в патроне. Под воздействием гидродинамической нагрузки разрушается полиэтиленовый корпус патрона, начинается движение жидкости по трубе (об этом свидетельствуют полученные значения компонент вектора скорости жидкости),

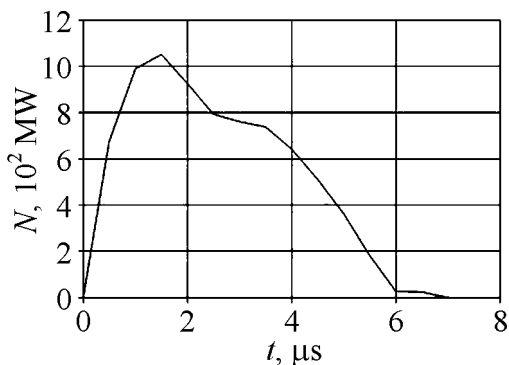


Рис. 2. Временная зависимость электрической мощности в канале разряда

что приводит к перемещению пластины. Давление жидкости на нее сначала распределяется неравномерно, но довольно быстро выравнивается. После достижения своего максимального значения давление на пластину, как и во всей области жидкости, интенсивно падает (рис. 3). То есть уменьшаются гидродинамическая нагрузка на пластину и, следовательно, ускорение пластины (рис. 4).

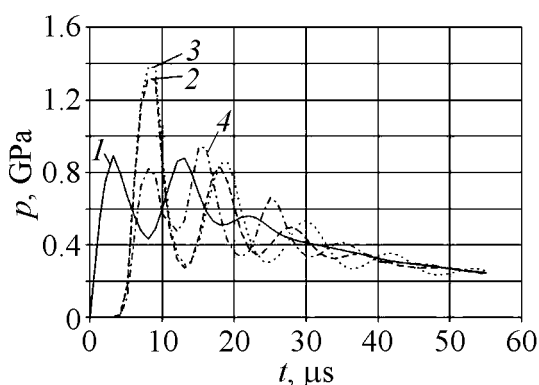


Рис. 3. Временная зависимость давления на метаемую пластину: 1 – в канале разряда; 2, 3 и 4 – в точках соответственно $r = 0.5R$, $0.75R$ и $0.95R$

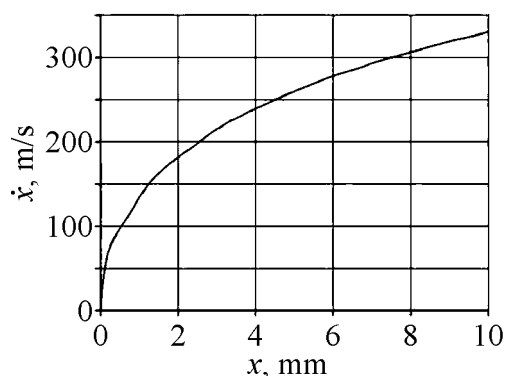


Рис. 4. Зависимость скорости движения пластины от перемещения

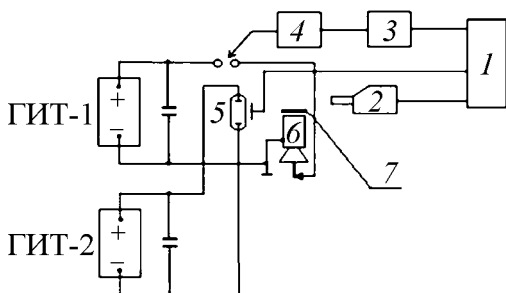


Рис. 5. Схема измерения скорости метаемой пластины методом фоторегистрации: 1 – пульт ВФУ-1; 2 – камера ВФУ-1; 3 – запускающее устройство; 4 – блок поджига; 5 – лампа ИФК-2000; 6 – электровзрывной патрон; 7 – объект исследования

Параллельно кинематику движения метаемого элемента исследовали с помощью высокоскоростной фоторегистрирующей установки ВФУ-1, работающей в режиме кадровой съемки. Схема измерений приведена на рис. 5.

В состав схемы измерения входят два генератора импульсных токов (ГИТ): ГИТ-1 служит для реализации метания образца, ГИТ-2 осуществляет питание лампы, обеспечивающей подсвечивание исследуемого объекта. Выбранная схема подсветки в проходящем свете, когда лампа расположена за объектом, обеспечила возможность получения силуэтных снимков метаемого образца с частотой съемки до $1.4 \cdot 10^5$ кадров в секунду.

Съемку процесса движения деформируемого образца проводили с применением двухрядной вставки. Были получены снимки последовательных фаз движения образца массы $m \approx 21.4$ г под воздействием гидродинамической нагрузки, создаваемой взрывом проводника в патроне, с интервалами между кадрами $7.4 \mu\text{s}$. Результаты скоростной фоторегистрации (СФР-граммы) процесса движения метаемого образца представлены на рис. 6. Здесь на светлом фоне подсветки перемещающийся участок образца отображен темным силуэтом.

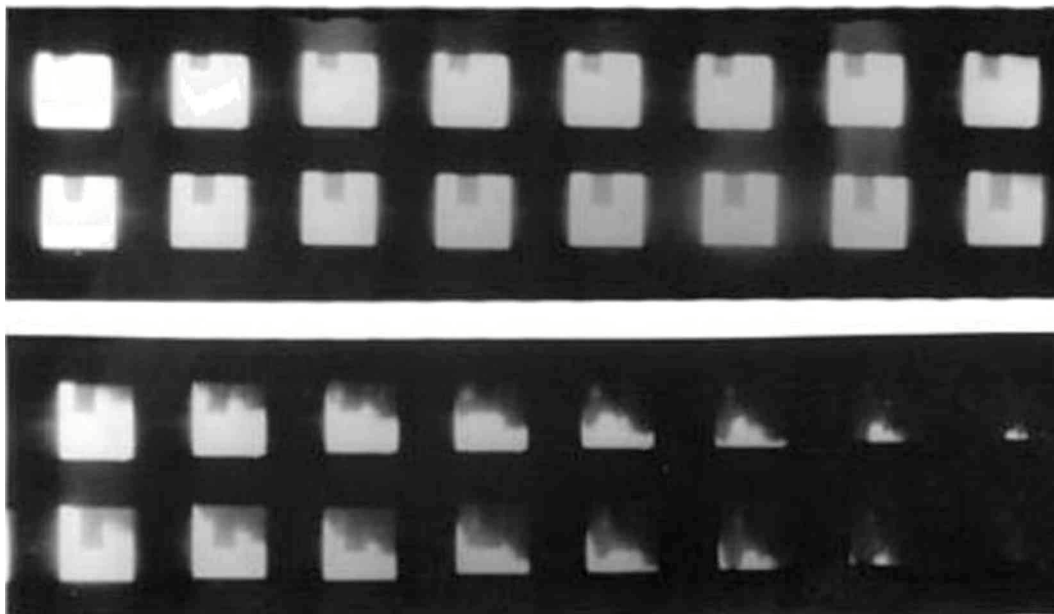


Рис. 6. СФР-грамма процесса движения метаемого образца массой $m \approx 21.4$ г в условиях, имитирующих процесс сварки ВСУ

Экспериментальная зависимость перемещения пластины от времени, построенная по результатам обработки СФР-грамм, представлена на рис. 7 кривой 1, а полученная при решении задачи (1)–(6) – кривой 2.

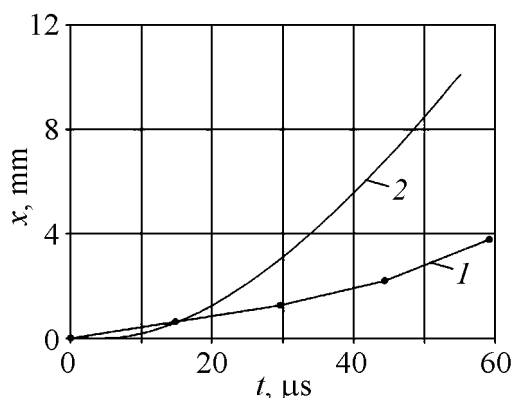


Рис. 7. Перемещение пластины в зависимости от времени: 1 – экспериментальная кривая, 2 – расчетная

Сначала (до момента времени перемещения пластины на расстояние $x \approx 1.3$ мм) расхождение теоретических и экспериментальных данных незначительно, но со временем расстояние между кривыми растет, что следует объяснить погрешностями эксперимента и неоправданными допущениями при математическом моделировании (например, математическая модель не учитывает истечение жидкости из электровзрывного патрона).

Иными словами, данная математическая модель не позволяет с достаточной степенью достоверности определить скорость перемещения метаемой пластины в момент ее соударения с неподвижной. Но максимальное значение гидродинамической нагрузки на пластину достигается в момент времени, когда перемещение пластины еще мало (в рассматриваемом примере оно меньше 0.1 mm), поэтому результаты решения задачи могут быть использованы при анализе процесса сварки пластин и их напряженно-деформированного состояния в начальный период времени процесса. С помощью математической модели можно оценить также влияние на скорость (как и на другие характеристики сварки ВСУ) массы метаемой пластины, геометрии патрона, расстояния между пластинами, параметров электрической цепи и т.д.

Выводы

Математическая модель, описывающая гидродинамику электровзрывного патрона, расположенного в трубе бесконечной длины, может быть использована при анализе процесса сварки двух пластин ВСУ и их напряженно-деформированного состояния только в начальный период времени процесса.

При исследовании всего процесса сварки ВСУ обязательно необходимо учитывать вытекание жидкости из втулки.

1. *Б.Я. Мазуровский*, Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов, Наукова думка, Киев (1980).
2. *В.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат*, Проблемы гидродинамики и их математические модели, Наука, Москва (1977).
3. *Г.А. Барбашова*, ЭОМ № 1, 44 (2009).
4. *С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др.*, Численное решение многомерных задач газовой динамики, Наука, Москва (1976).
5. *К.А. Наугольных, Н.А. Рой*, Электрические разряды в воде, Наука, Москва (1971).

Г.О. Барбашова, Л.Ю. Демиденко, В.Д. Половинка, Р.В. Тертілов

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВИСОКОШВИДКІСНИМ УДАРОМ

Досліджено можливість застосування математичної моделі, що описує гідродинаміку електровибухового патрону, розташованого в трубі безкінечної довжини, для вивчення процесу зварювання двох пластин високошвидкісним ударом (ВШУ). Доведено допустимість використання цієї моделі при аналізі початкового періоду процесу.

Ключові слова: математична модель, високошвидкісний удар, зварювання, гідродинамічне навантаження, швидкість переміщення пластины

G.A. Barbashova, L.Yu. Demidenko, V.D. Polovinka, R.V. Tertilov

MATHEMATICAL MODELING OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN WELDING BY HIGH-SPEED IMPACT

The application possibility of mathematical model which describes the hydrodynamics of electroexplosive patron located in a tube of infinite length for research of a high-speed welding process of two plates is investigated. An application competence of this model for analysis of the initial period of a transient process is proved.

Keywords: mathematical model, high-speed impact, welding, hydrodynamic pressure, displacement speed of the plate

Fig. 1. The principal scheme of the research area: 1 – shape of the tube, 2 – the polyethylene floor, 3 – the metal plate, 4 – the fixed plate, 5 – the microconductor to be exploded

Fig. 2. Time dependence of the electrical power injected to the discharge channel

Fig. 3. Time dependence of the pressure on the metal plate: 1 – pressure in the discharge channel; 2, 3 and 4 – pressure at the points $r = 0.5R$, $0.75R$ and $0.95R$, correspondingly

Fig. 4. The dependence of the rate of plate motion on the displacement

Fig. 5. The speed measurement scheme of the displaced plate by the method of photo-registration: 1 – the HPD panel-1; 2 – the HPD camera-1; 3 – the starting device; 4 – the ignition module; 5 – the IFK-2000; 6 – electro-exploding patron; 7 – the investigation object

Fig. 6. SFR-gram of the movement process for the sample with the weight of $m \approx 21.4$ g displaced in conditions simulating the process of MAT welding

Fig. 7. Time dependence of the displacement of the plate: 1 – experimental curve, 2 – calculated curve