

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ НА СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43а, 54018, г. Николаев, Украина*

В ранее проведенных исследованиях показано, что снижение остаточных напряжений в сварных соединениях при электрогидроимпульсной обработке (ЭГИО) происходит под действием импульсных давлений, создаваемых электрическим разрядом в воде [1]. Однако остается невыясненным влияние основных параметров импульса давления в канале разряда (максимального давления  $(p_k)_m$  и величины импульса давления  $I = \int_0^t P_k dt$ ) на снижение остаточных напряжений, что является немаловажным фактором при назначении режимов обработки для снижения остаточных, в том числе сварочных, напряжений.

В работе [2] исследовано влияние параметров разрядного контура на снижение остаточных напряжений и сделан вывод об эффективности последних, определяемых как амплитудой, так и величиной импульса давления. При этом диапазон изменения амплитуды и импульса давления в канале разряда не указан. Приближенная оценка этих результатов, проведенная по методике [3], которая позволяет определять значения параметров импульса давления в зависимости от параметров разрядного контура, показала, что изменение емкости конденсаторной батареи в пределах 3–9 мкФ, при неизменяемых остальных параметрах разрядного контура, приводит к увеличению импульса давления в 2 раза, а его амплитуды – на 26%. В итоге эффективность обработки увеличивается на 45%. В случае изменения индуктивности разрядного контура от 7 до 66 мкГн при тех же условиях происходит уменьшение в 3 раза амплитуды давления и незначительно – его импульса. При этом эффективность снижения остаточных напряжений уменьшилась на 10%. Приведенные расчеты согласуются с выводом, сделанным в работе [2], о влиянии величины импульса давления на снижение остаточных напряжений. В то же время влияние амплитуды давления на снижение остаточных напряжений остается невыясненным.

Цель работы – изучить влияние максимального давления в канале разряда на степень снижения остаточных растягивающих напряжений при ЭГИО.

Исследования проводились на стальных образцах размером 280×40×4 мм. Напряжения в образцах создавались при помощи растяжения их в оснастке до предела текучести (рис. 1) и измерялись до и после ЭГИО путем замера деформаций на базах длиной 200 мм по методике, изложенной в [2]. Предел текучести определялся экспериментально испытанием образцов на растяжение. В результате установлено, что предел текучести материала образцов составляет 260 МПа. Затем он создавался в образцах перед ЭГИО.

Каждый образец нагружался 50 импульсами давления. Разряды производились с одной стороны на среднюю часть растянутого образца. Во всех случаях для стабилизации энерговыделения в канале разряда разрядный промежуток замыкался микропроводником диаметром 0,06 мм. На каждом режиме обрабатывалось по три образца. Одновременно проводилось осциллографирование разрядного тока и напряжения, что позволило контролировать энерговыделение в канале разряда.

Режимы обработки выбирались из условия максимально возможного изменения амплитуды давления при неизменной величине импульса давления.

Давление в канале разряда определялось при решении гидродинамической задачи о расширении вдоль жесткой пластины и в окружающую среду парогазовой полости (канала разряда), образующейся при электрическом взрыве микропроводника.

При этом были приняты следующие допущения. Канал разряда в начальный момент времени имеет форму прямого кругового цилиндра, высота которого равнялась расстоянию между электро-

дом и пластиной (длина микропроводника). Пластина была абсолютно жесткой, неподвижной и неограниченной. Жидкость, в которой она находилась, – идеально сжимаемой. Канал разряда заполнен идеальной низкотемпературной плазмой.

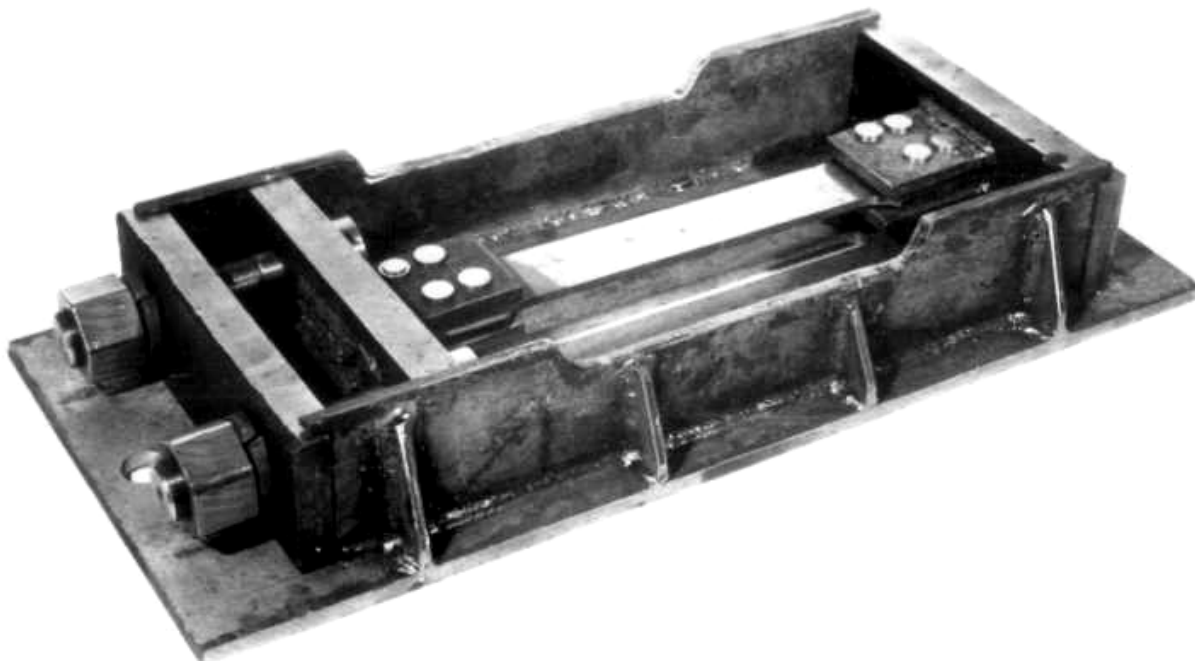


Рис. 1. Оснастка для создания в образцах остаточных напряжений

В соответствии с принятыми допущениями математическая постановка задачи запишется следующим образом. В области, ограниченной неподвижной жесткой стенкой (поверхность пластины), контактным разрывом плазма–вода (стенка канала разряда) и ударной волной, необходимо решить систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, записанную в цилиндрической системе координат [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial (r \cdot \rho)}{\partial t} + \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial z} + \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial t} + \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial z} + \frac{\partial [r \cdot (\rho \cdot v_r^2 + p)]}{\partial r} = p, \\ \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial t} + \frac{\partial [r \cdot (\rho \cdot v_z^2 + p)]}{\partial z} + \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial (r \cdot e)}{\partial t} + \frac{\partial [r \cdot (e + p) \cdot v_z]}{\partial z} + \frac{\partial [r \cdot (e + p) \cdot v_r]}{\partial r} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

которая замыкается двучленным уравнением состояния:

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

где  $t$  – время;  $r, z$  – цилиндрические координаты;  $v_r, v_z$  – радиальная и осевая компоненты вектора скорости жидкости;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $e = \rho [\varepsilon + (v_r^2 + v_z^2) / 2]$ ;  $\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия;  $\rho_0, c_0$  – плотность и скорость звука в покоящейся жидкости;  $\kappa = 7,15$ .

Граничные условия:

– на контактном разрыве плазма–вода допускалось давление, которое определялось из уравнения баланса энергии [5]:

$$\frac{1}{(\gamma-1)} \cdot \frac{d(p_k V_k)}{dt} + p_k \cdot \frac{dV_k}{dt} = N(t), \quad (3)$$

где  $p_k, V_k$  – соответственно давление в канале разряда и его объем;  $\gamma = 1,26$ ;  $N(t)$  – закон ввода мощности в канал разряда;

– на ударной волне должны выполняться условия динамической совместности [4]:

$$\begin{aligned} [\rho] D - [\rho v_n] &= 0, \\ [\rho v_n] D - [\rho v_n^2 + p] &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$[\rho(\varepsilon + v_n^2/2)] D - [\rho v_n(\varepsilon + v_n^2/2) + p v_n] = 0,$$

где  $v_n$  – нормальная составляющая вектора скорости жидкости;  $D$  – скорость ударной волны;  $[f] = f_1 - f_2$ ;  $f_1, f_2$  – значения функции слева и справа от ударной волны;

– на неподвижной жесткой стенке:

$$v_n = 0. \quad (5)$$

Начальные условия:

– параметры жидкости равны своим значениям в невозмущенной среде. Радиус канала разряда  $r_0$ , скорость его расширения  $v_0$  и давление в нем  $(p_k)_0$  определялись по формулам [6]:

$$r_0 = \left( \frac{U_0^2 \cdot C_0^2 \cdot L}{\rho_0 \cdot l} \right)^{1/4} \cdot \Phi_1(\eta),$$

$$v_0 = \left( \frac{U_0^2}{\rho_0 \cdot L \cdot l} \right)^{1/4} \cdot \Phi_2(\eta),$$

$$p_{k_0} = (\gamma - 1) \cdot A \cdot \sigma_0,$$

где  $U_0$  – напряжение заряда;  $C$  – емкость конденсаторной батареи;  $L$  – индуктивность электрической цепи;  $l$  – длина микропроводника;  $A$  – искровая постоянная,  $A = 0,25 \cdot 10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $\eta$  – доля энергии, выделившейся в течение первого полупериода электрического разряда,

$\eta = \left( \frac{\pi \cdot A \cdot l^2}{U_0^2 \cdot \sqrt{L \cdot C}} \right)^{1/3}$ ;  $\sigma_0$  – начальная удельная электропроводность,  $\sigma_0 = \frac{l}{R_0 \cdot \pi \cdot r_0^2}$ ;  $R_0$  – начальное

омическое сопротивление,  $R_0 = 270 \cdot \sqrt{L/C}$ ;  $\Phi_1(\eta)$ ,  $\Phi_2(\eta)$  – таблично заданные функции [6].

Система уравнений (1)–(2) решается конечно-разностным методом Годунова [1]. Расчетная сетка состоит из веера неподвижных лучей, выходящих из начала координат (первый луч лежит на пластине, а последний – на оси симметрии микропроводника) и перемещающихся

вдоль них линий, первой из которых является стенка канала разряда, а последней – ударная волна. Внутренние узлы сетки расположены вдоль лучей равномерно. Давление в канале разряда определяется из уравнения (3) двушаговым методом Эйлера. Объем канала разряда и его производная по времени вычисляются по координатам поверхности канала и скорости его расширения, получены при решении задачи о распаде произвольного разрыва [4] на контактной границе плазма-вода.

Закон ввода мощности  $N(t)$  определялся по экспериментальным значениям разрядного тока и напряжения. При выполнении расчетов, в частности, определены закон изменения давления в канале разряда и его импульс, который вычислялся по формуле

$$I = \int_0^T p_k \times dt \approx \sum_i (p_k)_i \times (\Delta t)_i,$$

где  $T$  – время окончания счета;  $\Delta t$  – шаг по времени.

Расчетным и экспериментальным способами подобраны три режима обработки с максимальными давлениями в канале разряда, равными 63, 110 и 184 МПа (рис. 2), и практически неизменной величиной импульса давления 2300 Па·с (рис. 3). Первый режим обработки (кривая 1) имел следующие параметры разрядного контура:  $U = 20$  кВ,  $C = 5,7$  мкФ,  $L = 25,5$  мкГн,  $l = 0,198$  м. Второй режим (кривая 2) соответственно –  $U = 20$  кВ,  $C = 5,7$  мкФ,  $L = 8,5$  мкГн,  $l = 0,143$  м. Третий – (кривая 3):  $U = 50$  кВ,  $C = 1,9$  мкФ,  $L = 8,5$  мкГн,  $l = 0,270$  м.

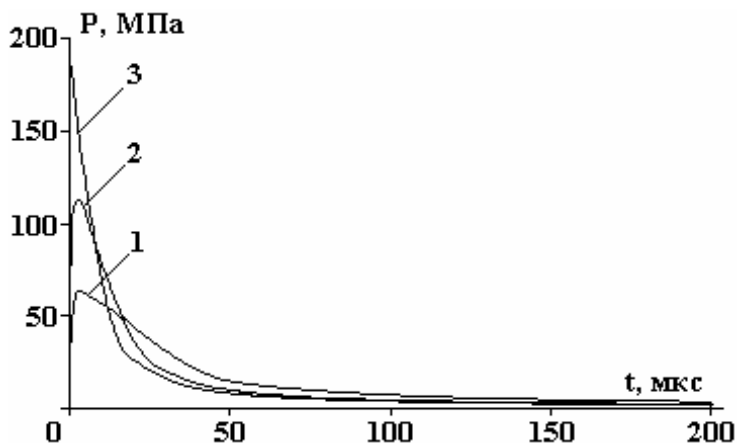


Рис. 2. Давление в канале разряда в режимах 1, 2 и 3

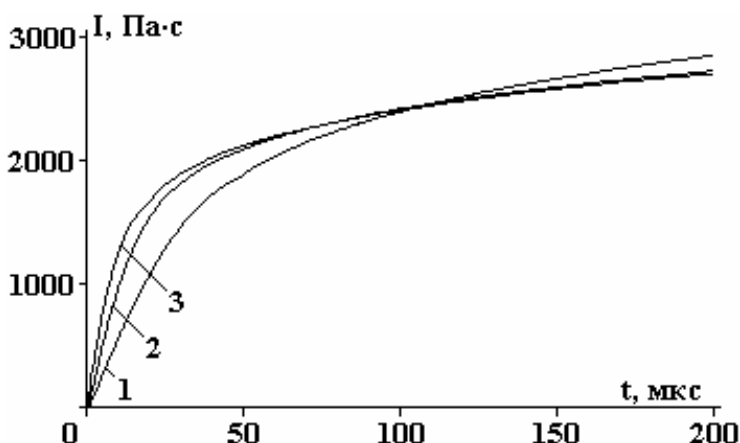


Рис. 3. Импульс давления в канале разряда в режимах 1, 2 и 3

В результате обработки экспериментальных образцов на этих режимах достигнуто снижение остаточных напряжений на 10, 12 и 15 % соответственно. Таким образом, изменение максимального давления почти в три раза (от 0,23 до 0,64  $\sigma_T$  материала) незначительно повлияло на

эффективность снижения остаточных напряжений.

В результате установлено, что в рамках проведенного эксперимента эффективность снижения остаточных напряжений определяется в основном величиной импульса давления и практически не зависит от максимального давления в канале разряда.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Опара В.С.* Электрогидроимпульсный метод снижения остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварочное производство. 1990. № 2. С. 12–13.
2. *Опара В.С., Юрченко Е.С., Петушков В.Г.* Влияние параметров разрядного контура на эффект снижения остаточных напряжений при электрогидроимпульсной обработке // Автоматическая сварка. 1982. № 12. С. 60–61.
3. *Кривицкий Е.В., Шамко В.В.* Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наук. думка, 1979. 207 с.
4. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под. ред. С.К.Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.
5. *Наугольных К.А.* Электрические разряды в воде / К.А.Наугольных, Н.А. Рой. М.: Наука, 1971. 155 с.
6. *Вовченко А.И.* Начальные условия для задачи о численном исследовании динамики подводного искрового разряда // Праці ІЕД НАНУ Електродинаміка: зб. наук.пр. К.: ІЕД НАН України, 2001. С. 117–120.

*Поступила 05.04.06*

#### Summary

The influence of pressure parameters in a discharge filament generated by a high-voltage electric discharge in water on the drop of residual stresses is examined in this work. It is demonstrated that the level of the drop of residual stresses is determined by the pressure pulse value. A design procedure of pressure pulse parameters in a discharge filament is given. An experimental estimation of the effect of pressure amplitude in a discharge filament on the drop of tensile residual stresses in metal models is carried out. It is determined that the efficiency of the drop of residual stresses is mainly defined by the value of pressure pulse and practically does not depend on the maximum pressure in a discharge filament.

---