

УДК 621.983.044

М.В. Высоцкий (5 курс, каф. МиТОМД),
 С.М. Тарелкин, к.т.н., доц., И.А. Шапошников, к.т.н., доц.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ

Электрогидроимпульсная штамповка (ЭГИШ), основанная на силовых эффектах высоковольтного разряда в жидкости (рис.1), является одним из эффективных методов импульсной обработки материалов давлением. Конденсаторная батарея C при помощи выпрямителя V_z через сопротивление, ограничивающее ток заряда R_z заряжается до напряжения U_0 в десятки кВ, а затем при помощи управляемого разрядника K осуществляется высоковольтный разряд между электродами 2 в жидкости. Возникающее при расширении плазменной полости импульсное давление в разрядной камере 1 может достигать сотен МПа, что достаточно для формоизменения листовой заготовки 3 в соответствии с рельефом матрицы 5.

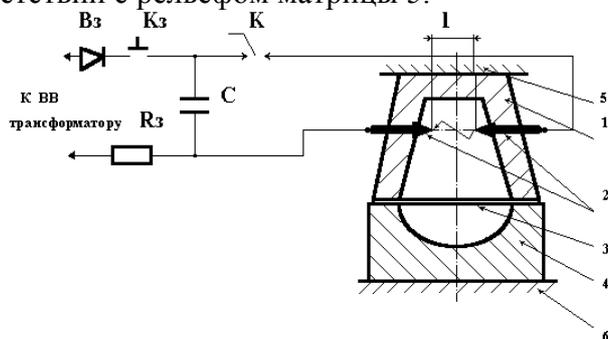


Рис. 1. Схема ЭГИШ: 1 - разрядная камера;
 2 – электроды; 3 – заготовка; 4 - матрица;
 5, 6 - механические прижимы

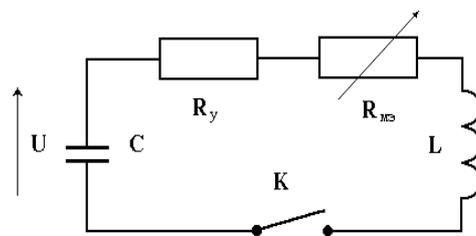


Рис. 2. Эквивалентная схема
 разрядного контура

Главной проблемой ЭГИШ является низкий КПД процесса, определяемый сложной и многоступенчатой физикой преобразования энергии заряда конденсаторной батареи в энергию пластической деформации заготовки. Задачами данного исследования являлись численная оценка КПД и определение путей его увеличения.

Общий КПД можно определить тремя составляющими: электрическим (η_e), гидродинамическим (η_g) и механическим (η_m), которые для промышленных электрогидроимпульсных установок находятся в следующих пределах:

$$\eta_e \in [0.3 \dots 0.9]; \quad \eta_g \in [0.3 \dots 0.9]; \quad \eta_m \in [0.4 \dots 0.7].$$

При проектировании новой установки особое значение приобретает увеличение величины электрического КПД разряда.

Для выбора оптимальных параметров электрогидроимпульсной установки необходимо осуществлять расчет разрядного тока в контуре с переменным активным сопротивлением, определяемым физическими процессами в разрядном промежутке. Для правильного расчета процесса необходимо корректно задать физическую модель электрического пробоя в жидкости. Высоковольтный разряд в жидкости представляет весьма сложный комплекс физических явлений, характер которого зависит от большого числа параметров разрядного контура, плазменного канала, рабочей жидкости, разрядной камеры и заготовки. Возможны два характерных режима разряда - лидерный и тепловой. Лидерный режим имеет место при относительно высокой удельной напряженности электрического поля. В промышленных установках для ЭГИШ часто реализуется

тепловой режим разряда, который характеризуется напряженностью электрического поля 0.5...1.5 кВ/мм. Физическая модель теплового пробоя разрядного промежутка работает, если считать жидкость средой, проводящей электрический ток. Для определения является ли жидкость электропроводной необходимо сопоставить характеристическое время с характерным временем действия электрического поля τ_e время диэлектрической релаксации τ_p , которое определяется соотношением:

$$\tau_p = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \sigma,$$

где $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε - диэлектрическая проницаемость жидкости; σ - электрическая проводимость жидкости. Если $\tau_e \gg \tau_p$, то жидкость ведет себя, как проводящая. Для технической воды $\sigma = 10^{-2} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$, $\varepsilon = 80$; $\tau = 10^{-9}$ с. В условиях высоковольтного разряда при ЭГИШ техническая вода может считаться проводящей жидкостью.

Рассматривались три варианта разряда: с характерным временем $t_1 < 30...40$ мкс (t_1 - длительность первого полупериода разрядного тока); с характерным временем $t_1 > 100$ мкс; с характерным временем $40 > t_1 > 100$ мкс. Для первого варианта разряда ($t_1 < 30...40$ мкс) за счет достаточно быстрого выделения энергии в канале разряда практически вся вводимая энергия затрачивается на повышение внутренней энергии и расширение канала. При втором варианте разряда ($t_1 > 100$ мкс) потери энергии на теплообмен велики. Третий вариант разряда является промежуточным.

Для создания математической модели рассматривался первый вариант разряда. Анализировались переходные процессы в разрядном контуре с переменным сопротивлением (рис. 2). Здесь L - индуктивность разрядного контура, определяемая в основном индуктивностью подводов и полагаемая постоянной, $R_{мэ}$ - переменное сопротивление межэлектродного промежутка; R_y - паразитное сопротивление подводов и других элементов разрядного контура; C - емкость конденсаторной батареи; K - условно в виде ключа показан разрядник; U - напряжение на конденсаторной батарее, в начальный момент равно U_0 . Электрический КПД может быть определен отношением энергии, выделившейся на межэлектродном промежутке, к энергии заряда конденсаторной батареи W_0 :

$$\eta_{э} = \left[\int_0^{t^*} i^2(t) R_{мэ} dt \right] / W_0 .$$

В этом выражении i - ток разряда; t^* - некоторое характерное время, в течение которого осуществляется эффективное выделение электрической энергии на искровом промежутке. В зависимости от затухания электрического тока и длительности выделения энергии обычно принимают $t^* = (1..2) T_0$, где T_0 - условный период разрядного тока.

Для определения $\eta_{э}$ численно решалось дифференциальное уравнение для разрядного тока с переменным сопротивлением, зависящим от времени, величины тока, давления в разрядной камере и ряда других параметров. Установлено, что на величину $\eta_{э}$, кроме параметров разрядного контура влияние оказывает величина давления в рабочей жидкости, зависящая от энергии разряда, объема разрядной камеры, податливости деформируемой заготовки и ряда других факторов. Степень этого влияния возрастает с увеличением давления в жидкости, что подтверждается экспериментальными исследованиями. Создание предварительного (перед разрядом) давления в рабочей жидкости может нарушить физический механизм теплового пробоя и значительно снизить КПД процесса. Результаты работы использованы для разработки рекомендаций по проектированию электрогидроимпульсных установок.

Выводы. Уточнена физическая модель высоковольтного пробоя в жидкости при электрогидроимпульсной штамповке. Для варианта разряда с характерным временем $t_1 < 30...40$ мкс на основе физической модели разработана математическая модель процесса, позволившая оценить влияние основных параметров на величину электрического КПД. Установлено, что рост давления в рабочей жидкости приводит к снижению КПД.