

Определение параметров разрядного контура электрогидравлического пресса при штамповке листовых деталей сложной формы

*Н. В. Старков, И. Н. Старков

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Богоявленский (Октябрьский) 43-А, г. Николаев, 54018, Украина,
e-mail: starkovnikolay@yahoo.com

Для определения параметров разрядного контура электрогидравлического пресса при штамповке в многоимпульсном режиме деталей сложной формы разработана инженерная методика расчета, выполнена ее экспериментальная оценка на примере штамповки детали «боковая стойка легкового автомобиля». Предложен алгоритм решения задачи, который предусматривает нахождение самой сложной для штамповки точки на поверхности детали, определение расчетным путем доминирующего фактора процесса электрогидравлического деформирования в этой точке, сравнение расчетной величины давления с результатами эксперимента и вычисление требуемой энергии разряда для полного формообразования детали.

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд, жидкость, ударная волна, квазистатическое давление, штамповка, электрогидравлический пресс, деталь.

УДК 621.7.044:669.71

ВВЕДЕНИЕ

Выделение энергии в канале разряда и его последующее расширение сопровождаются излучением импульсов давления жидкости, образованием расходящегося потока жидкости и пульсацией парогазовой полости. Действие указанных факторов на объект определяет процесс импульсной электрогидравлической (ЭГ) штамповки.

Процесс ЭГ штамповки деталей из листовых заготовок осуществляется, как правило, в многоимпульсном режиме, исключение составляют разделительные операции вырубки и пробивки отверстий.

Наиболее сложными для расчетов параметров штамповки являются операции вытяжки и раздачи трубчатых деталей. Анализируя механизм деформирования таких деталей [1, 2], можно отметить, что при неизменных параметрах разрядной цепи при каждом последующем разряде от начала штамповки до заключительной стадии изготовления детали существенно изменяются процессы в разрядной камере. По мере увеличения деформации возрастает конструктивная жесткость детали, происходит деформационное упрочнение материала штампуемой детали, увеличиваются расстояние от канала разряда до детали, а также объем жидкости в разрядной камере за счет деформации детали. Все это усложняет задачу расчета параметров ЭГ штамповки. Вместе с тем часто достаточно знать только параметры разряда на этапе полного формообразования детали, когда она оконча-

тельно приобретает форму матрицы. Это позволяет правильно оценить энергетические возможности ЭГ пресса при изготовлении деталей сложной формы.

Цель настоящей работы – разработка и выполнение оценки инженерной методики расчета параметров разрядного контура ЭГ пресса при изготовлении деталей сложной формы.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Процесс формообразования деталей при ЭГ штамповке заканчивается достижением требуемой кривизны в двух- или трехгранных внутренних углах матрицы, а также в местных углублениях матрицы – пуклевках. Это так называемые проблемные точки для ЭГ штамповки, поскольку они требуют больших динамических усилий формообразования, а значит, наибольшего давления рабочей жидкости, которое на один–два порядка больше, чем то, которое необходимо в начале деформирования детали.

Следует также отметить, что в отличие от лабораторных исследований на ЭГ прессе не представляется возможным вносить конструктивные изменения, касающиеся работы высоковольтного оборудования. По этой причине электрические параметры работы ЭГ пресса могут изменяться только за счет изменения напряжения разрядов и их количества. Существует также ряд технологических параметров, которые влияют на процесс ЭГ штамповки, но они являются нерегулируемыми и имеют второстепенное значение.

Характерная особенность ЭГ прессов – использование замкнутых разрядных камер с

высокой концентрацией выделяемой при разряде энергии (до 10 Дж/см³).

В работе [3] одним из основоположников взрывной штамповки Р.В. Пихтовниковым было предложено при больших размерах изделия, когда штамповка производится несколькими рядами, определять энергию деформации не всего изделия, а отдельных, самых сложных участков, над которыми будут расположены заряды с весом, пропорциональным потребной энергии деформации этого участка. При ЭГ штамповке таких деталей достаточно будет определить место расположения электродов относительно детали и необходимую энергию разряда.

Следуя этой идее, можно предложить следующий алгоритм решения задачи определения параметров ЭГ штамповки детали сложной формы.

1. Найти проблемные точки на поверхности детали.
2. Рассчитать требуемое давление P_{TP} жидкости для деформирования детали в этих точках.
3. Определить параметры ударной волны в проблемной точке P_0 .
4. Узнать квазистатическое давление жидкости в разрядной камере $P_{кв}$.
5. Установить доминирующий фактор высоковольтного разряда в жидкости при изготовлении детали сложной формы.
6. Определить требуемую для штамповки детали запасаемую энергию ЭГ прессы.

Исследования проводились на примере ЭГ штамповки средней боковой стойки кузова легкового автомобиля (чертеж В-Pillar Quarter Reinforcement 7T43-724320) [4].

Краткая характеристика детали:

Размеры детали после изготовления, мм: длина – 1350; ширина – 410; высота – 220; толщина листа – 1,4.

Форма детали и проблемные точки на ней изображены на рис. 1.

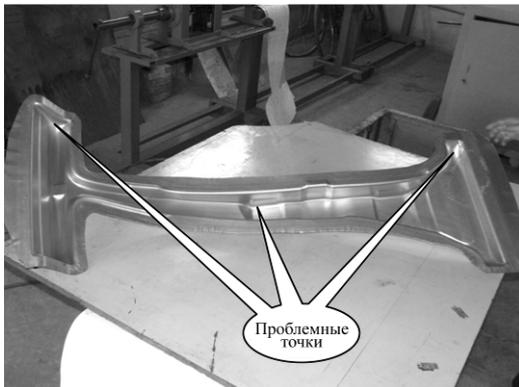


Рис. 1. Средняя боковая стойка легкового автомобиля.

По чертежу наименьший внутренний угловой радиус находился в средней части детали, где он

на матрице составлял $R_m = 6$ мм.

Для оценки требуемого давления жидкости P_{TP} при формообразующих операциях ЭГ штамповки можно пользоваться зависимостями, полученными из уравнения Лапласа для двухосного напряженного состояния листового материала [5]:

$$\frac{P_{TP}}{S} = \frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2}, \quad (1)$$

где R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны, м; σ_1, σ_2 – напряжение в плоскостях главных радиусов, Па; S – толщина штампуемого листа, м.

В случае с двухгранными углами и одноосным напряженным состоянием материала, например, при штамповке длинных рифтов, когда $R_2 \rightarrow \infty$, зависимость (1) принимает вид:

$$P_{TP} = S\sigma_1 \frac{1}{R_1}. \quad (2)$$

Величиной σ_1, σ_2 можно задаться исходя из соображения, что значение этих напряжений не может быть больше, чем предел прочности штампуемого материала, или эти напряжения должны соответствовать допустимой или требуемой степени деформации детали в заданной точке.

В местных углублениях (пуклевках), имеющих полусферическую форму, когда $R_1 = R_2$, а $\sigma_1 = \sigma_2$, требуемое давление определяется:

$$P_{TP} = 2S\sigma_1 \frac{1}{R_1}. \quad (3)$$

При высоковольтном разряде выделившаяся в канале энергия расходуется на работу расширения канала, нагрев, излучение и образование продуктов распада жидкости. Работа расширения канала, которая, по данным [6, 7], составляет 50–60% от всей выделившейся в нем энергии, включает работу, совершаемую волнами сжатия (20–30%) на стадии разряда, и работу парогазовой полости (примерно 30%). Ударная волна образуется в момент достижения максимальной скорости нарастания тока и соответственно мощности разряда в канале в первом полупериоде тока. Максимальное давление на фронте ударной волны P_m определяется параметрами разрядного контура и может быть найдено с помощью известных зависимостей [8]:

$$P_m = \frac{b(\eta) \rho_0^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{\sqrt{r} L^{3/8} l^{5/8}}, \quad r \leq 2,5l; \quad (4)$$

$$P_m = \frac{b(\eta)(1-0,1r/l) \rho_0^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{\sqrt{r} l^{5/8} L^{3/8}}, \quad 2,5l \leq r \leq 5,5l; \quad (5)$$

$$P_m = \frac{1,6b(\eta) \rho_0^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{r^{1,1} L^{3/8}}, \quad 5,5l \leq r \leq 200l, \quad (6)$$

где $b(\eta) = 0,05 [1 - 0,8(\eta - 0,7)^2]$; η – критерий

подобия, определяющий долю энергии, выделившейся в первом полупериоде ($0,4 \leq \eta \leq 1,0$ – в зависимости от характеристик разряда); в первом приближении можно усреднять $b(\eta)$ для указанного диапазона η ; ρ_0 – плотность рабочей жидкости, кг/м^3 ; C – емкость батареи конденсаторов, Φ ; U_0 – рабочее напряжение в разрядной цепи, В; L – индуктивность разрядной цепи, Гн; l – длина разрядного промежутка, м; r – расстояние от канала разряда до объекта штамповки, м.

При прочих равных условиях максимальное давление удастся получить при оптимальном значении расстояния между электродами, определяемого по формуле [9]:

$$l_{\text{опт.}} = 1,14 \cdot 10^{-3} U \sqrt[4]{LC}, \quad (7)$$

где U – напряжение разряда, В.

Следует отметить, что при искровом разряде, который реализуется в ЭГ прессах без применения вспомогательных средств в виде иницирующих проводников, реализовать разряд с оптимальным промежутком достаточно сложно. Для этого потребовалось бы достичь высокой напряженности электрического поля на конце электрода (более 36 кВ/см), который по условиям эксплуатации и по своим конструктивным особенностям не позволяет это сделать [10, 11]. По этой причине в ЭГ прессах используются разрядные промежутки в 2–2,5 раза меньшие, чем оптимальные, что, естественно, не позволяет получить максимальное давление ударной волны. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке процесса ЭГ штамповки.

При деформировании заготовки квазистатическим давлением его амплитудное значение определяется из уравнения баланса энергии, выделившейся в канале разряда, исходя из предположения, что в результате расширения парогазовой полости, образованной каналом разряда, происходят сжатие жидкости, находящейся в закрытой жесткой камере, и изменение ее объема. Считая, что давление распределяется равномерно по всему объему камеры и что изменение объема жидкости пропорционально давлению в камере, давление $P_{\text{кв}}$ (Па) можно найти из уравнения [2]:

$$P_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{W_0 E_{\text{ж}} (\nu - 1)}{V_{\text{ж}} (\nu + 1) \cdot 2}}, \quad (8)$$

где W_0 – энергия в импульсе, Дж; $E_{\text{ж}}$ – объемный модуль упругости жидкости, Н/м^2 ; $V_{\text{ж}}$ – объем жидкости в разрядной камере, м^3 ; ν – показатель адиабаты процесса.

Для упрощения расчетов можно принять линейную зависимость между объемом сжимаемой жидкости и давлением, используя объемный модуль упругости жидкости (воды)

$E_{\text{ж}} \approx 2,1 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, а для парогазовой полости $\nu = 4/3$ [2]. Тогда:

$$P_{\text{кв}} \approx 2,45 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{W_0}{V_{\text{ж}}}}. \quad (9)$$

Таким образом, исходя из характеристик формы детали и механических свойств материала, из которого она сделана, можно определить требуемое для ЭГ штамповки давление жидкости в проблемной точке. Затем рассчитать давление на фронте ударной волны и квазистатическое давление в разрядной камере при условии, что процесс формообразования закончен и деталь приобрела форму матрицы, сравнить их и получить ответ, какой из этих факторов является решающим на заключительном этапе ЭГ штамповки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Технические характеристики ЭГ пресса и экспериментального устройства, которые использованы в работе, приведены в табл. 1.

В расчете учитывались геометрические размеры разрядной камеры, форма готовой детали и материал, из которой ее изготавливали. Исследования выполняли на деталях из высокопрочной автомобильной стали HSLA350, диаграмма растяжения которой приведена на рис. 2 [12].

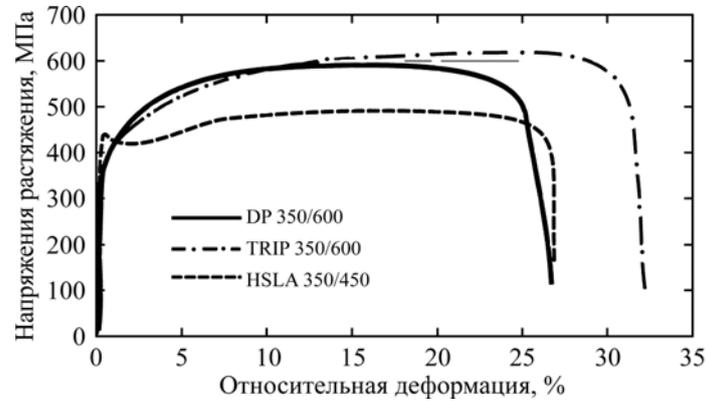
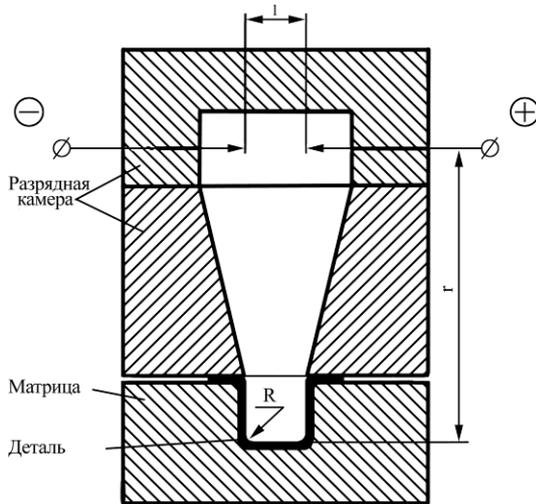
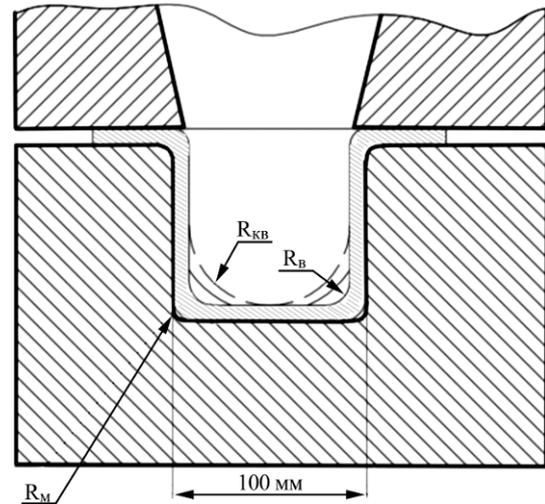
На рис. 3 показан поперечный разрез экспериментального устройства в средней части детали с указанием контролируемых размеров разрядной камеры, детали и матрицы.

Исходя из технических возможностей лабораторного оборудования, эксперименты по ЭГ штамповке деталей выполняли при запасаемой энергии $W_0 = 36,8$ кДж, рабочем напряжении $U_0 = 48$ кВ, длине разрядного промежутка $l = 100$ мм и емкости конденсаторной батареи $C = 32$ мкФ.

Цель эксперимента заключалась в том, чтобы на конкретной детали, средней боковой стойке легкового автомобиля, при постоянных параметрах разрядной цепи получить максимально возможную деформацию детали в проблемной точке, находящейся в средней ее части, измерить радиус кривизны детали R в этой точке и сравнить его с радиусом на матрице $R_{\text{м}}$. Затем по этим результатам расчетным путем определить, что обеспечило такую деформацию – ударные волны или квазистатическое давление, которые сопровождают высоковольтный электрический разряд в жидкости. В зависимости от этого по уравнениям (2), (5) или (9) рассчитать необходимую запасаемую энергию пресса для штамповки

Таблица 1. Технические характеристики ЭГ прессы и экспериментального устройства

Запасаемая энергия W_0 , кДж	6,4–40
Рабочее напряжение, регулируемое U_0 , кВ	20–50
Емкость батареи конденсаторов C , мкФ	32
Индуктивность разрядной цепи L , мкГн	4
Длина разрядного промежутка l , м	0,1
Объем разрядной камеры с деталью $V_{жс}$, м ³	0,056
Расстояние от канала разряда до детали r , м	0,34

**Рис. 2.** Диаграмма растяжения высокопрочных автомобильных сталей в координатах $\sigma - \varepsilon$.**Рис. 3.** Поперечный разрез разрядной камеры, детали и матрицы.**Рис. 4.** Деталь в матрице на разных стадиях формообразования.

детали с требуемыми размерами в проблемной точке.

Штамповка осуществлялась в металлическую матрицу в режиме многоимпульсного нагружения при постоянных параметрах каждого разряда. Плоская листовая заготовка в плане имела сложную конфигурацию, которая обеспечивала равномерное перемещение металла с фланца заготовки в матрицу. Заготовка прижималась к матрице усилием зажимного устройства ЭГ прессы. Фланец заготовки смазывали минеральным маслом МС-20.

Результаты эксперимента регистрировали обмером отштампованной детали в точке, имеющей наименьший угловой радиус на матрице ($R_m = 6$ мм), а также выполняли контроль стабильности разрядов по осциллограммам разрядного тока и напряжения.

Кроме того, в контрольной точке измеряли толщину детали и определяли относительное утонение материала.

На рис. 4 показаны деталь в матрице и ее форма на разных стадиях формообразования.

Результаты расчетов и экспериментальные данные приведены в табл. 2. В скобках после указания параметра даны номера формул, по которым он был рассчитан.

Приведенные в табл. 2 результаты исследования получены с учетом того, что в процессе деформирования детали сталь, из которой она изготавливалась, получила деформационное упрочнение, и на момент окончания штамповки предел текучести материала увеличился с 350 до 480 МПа. Учитывалось и то, что толщина листа на участке с радиусом 13,5 мм уменьшилась на 0,1 мм, что соответствует относительной дефор-

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные данные исследования

Наименование параметра	Расчетное значение	Результаты эксперимента
Требуемое для штамповки давление жидкости P_{TP} , МПа (2)	46,2	–
Квазистатическое давление P_{KB} , МПа (9)	19,85	–
Максимальное давление ударной волны P_m , МПа	42,5	–
Угловой радиус, формируемый ударной волной R_6 , мм	–	13,5
Угловой радиус, формируемый квазистатическим давлением R_{KB} , мм (3)	28,2	–
Угловой радиус матрицы R_m , мм	–	6
Относительное утонение на угловом радиусе, %	–	7,1

мации листа 7,1%. Эти данные использовались в расчете требуемого давления штамповки.

Над контролируемой точкой детали с наименьшим угловым радиусом выполняли шесть разрядов при запасаемой энергии 36,8 кДж. Увеличение количества разрядов не давало прироста деформации.

Анализируя результаты расчетов и эксперимента, можно утверждать, что определяющим фактором процесса ЭГ штамповки детали «средняя боковая стойка автомобиля» является ударная волна (см. табл. 2), генерируемая высоковольтным разрядом в жидкости. В начале деформирования используется энергия ударной волны и парогазовой полости. Как показывают расчеты, при угловом радиусе детали в контролируемой точке, равном примерно $R_{KB} = 28$ мм, квазистатического давления уже недостаточно для продолжения деформирования, и последующий процесс продолжается за счет ударной волны.

Расчетным путем также установлено, что для получения требуемого углового радиуса $R_m = 6$ мм в контролируемой точке детали необходимо давление ударной волны, равное примерно 104 МПа, что, в свою очередь, потребует увеличения запасаемой энергии прессы до 92 кДж.

Сравнение расчетных значений требуемого давления штамповки и давления ударной волны для полученного в эксперименте углового радиуса $R_6 = 13,5$ мм (см. табл. 2) показывает, что предложенная методика инженерных расчетов ЭГ штамповки позволяет успешно использовать ее на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для расчета параметров разрядного контура ЭГ прессы при штамповке деталей сложной формы можно использовать существующие математические зависимости, но при этом прежде всего нужно определить, где находятся самые сложные для формообразования участки на детали.

Максимальные параметры разрядной цепи будут определяться именно этими участками.

В зависимости от формы детали, ее размеров и прочности штампуемого материала могут использоваться разрядные камеры, сильно отличающиеся по размерам, а это, в свою очередь, будет определять, какой из действующих факторов высоковольтного разряда в жидкости будет доминирующим на заключительном этапе ЭГ штамповки – ударная волна или квазистатическое давление. В зависимости от этого потребуются принять такие технические решения, которые будут направлены на усиление эффекта того или иного фактора.

Предложен алгоритм решения задачи определения параметров ЭГ штамповки детали сложной формы.

На примере конкретной автомобильной детали выполнен расчет параметров ЭГ штамповки, который показал удовлетворительную сходимость с результатом эксперимента по основному параметру – максимальному импульсному давлению жидкости в контрольной точке на детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тараненко М.Е. *Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы*. Харьков: Издательский центр «ХАИ», 2011. 272 с.
2. Мазуровский Б.Я., Сизев А.Н. *Электрогидравлический эффект в листовой штамповке*. Киев: Наукова думка, 1983. 193 с.
3. Пихтовников Р.В., Завъялов В.И. *Штамповка листового материала взрывом*. М.: Машиностроение, 1964. 175 с.
4. Старков Н.В., Аврамец Д.Р., Головащенко С.Ф. *Материалы IX Международной научной школы-семинара «Импульсные процессы в механике сплошных сред»*. 15–19 августа 2011, Николаев, Украина. 2011. С. 313–316.
5. Исаченков Е.И. *Штамповка резиной и жидкостью*. М.: Машиностроение, 1967. 357 с.
6. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 155 с.

7. Мериин Б.В. *Электрогидравлическая обработка машиностроительных изделий*. Л.: Машиностроение, 1985. 119 с.
8. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
9. Гулый Г.А., Малюшевский П.П. *Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта*. М.: Машиностроение, 1977. 320 с.
10. Старков Н.В. *ЭОМ*, 2014, **50**(1), 115–120.
11. Konieczny A. *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines*. 2014, 2–5.
<http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/transformation-induced-plasticity-trip-steel/>

Поступила 16.08.16

Summary

To determine the parameters of the discharge circuit of the electrohydraulic press for forming complex-shaped parts in a multipulse mode, it is sufficient to know the required discharge parameters at the stage of the complete formation of a part. To this end, we developed an engineering method of calculation, carried out its experimental evaluation using the example of forming the part type – a “side pillar of the car”. The algorithm to solve this problem is proposed, which involves finding the point of the blank surface – the most difficult for forming, determining the dominant factor in the process of electrohydraulic forming of such a point by calculation, comparing the calculated pressure with the experimental results and the calculation of the required energy level necessary for the full formation of the part.

Keywords: high-voltage electric discharge, liquid, shock wave, quasi-static pressure, forming, electrohydraulic press, part.