

К.С. Арсентьева<sup>1</sup>, В.С. Мамутов<sup>2</sup>, А.О. Просторова<sup>3</sup>, В.П. Третьяков<sup>4</sup>

## **ТЕХНОЛОГИЯ И КОМПЬЮТЕРНЫЙ РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ**



<sup>1</sup>Ксения Сергеевна Арсентьева, к.т.н., доцент  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-9530, E-mail: xenia.ars@xmail.ru



<sup>2</sup>Вячеслав Сабайдинович Мамутов, д.т.н., профессор  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-9530, E-mail: mamutov\_vs@spbstu.ru.



<sup>3</sup>Александра Олеговна Просторова, к.т.н., доцент  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-9530, E-mail: prostorova\_ao@spbstu.ru.



<sup>4</sup>Валерий Павлович Третьяков, к.т.н., доцент  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-9302, E-mail: tretyakov\_vp@spbstu.ru.

### **Аннотация**

Статья посвящена исследованию условий, при которых происходит обрезка тонкостенной цилиндрической заготовки на режущей кромке ножа при комбинированной электрогидроимпульсной штамповке полых деталей с плоским фланцем. Получена эмпирическая зависимость предельного прогиба заготовки при ее формовке в кольцевой зазор на момент разделения материала от параметров материала, геометрических размеров заготовки и

оснастки. Проведено компьютерное моделирование исследуемого процесса в конечно-элементном комплексе LS-DYNA. Результаты исследований показали, что электрогидроимпульсная штамповка может совмещать за один переход такие операции как раздача, формовка, обрезка, пробивка, калибровка и отбортовка. Данная технология может эффективно использоваться при изготовлении полых пространственных деталей с фланцем.

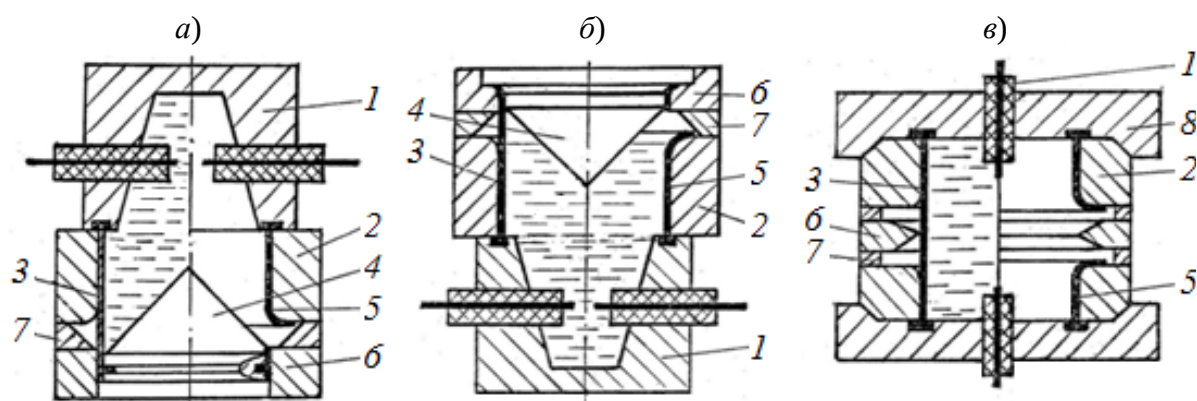
*Ключевые слова:* комбинированная электрогидроимпульсная штамповка, конечно-элементное моделирование, высокоскоростное деформирование, LS-DYNA, предельная деформация, тонкостенные цилиндрические детали.

## **Введение**

Электрогидроимпульсная (ЭГИ) штамповка листовых заготовок, основанная на применении энергии высокоскоростного электрического разряда в жидкости, успешно применяется при проектировании высокопроизводительных технологических процессов [1÷4], особенностью которых является комбинирование калибровки, разделительных (вырубка, пробивка) и формообразующих операций. При этом степень совмещения (отношение количества одновременно выполняемых операций к числу установок заготовки при штамповке) может достигать значений более 8 при различных сочетаниях последовательности выполнения [5]. При изготовлении деталей из тонкостенных пространственных заготовок зачастую применяется совмещение таких операций как раздача, формовка, обрезка, пробивка, калибровка и отбортовка. Предельные размеры заготовок зависят от формы и материала детали, технологической схемы выполнения операции, степени их совмещения, энергетических возможностей электрогидроимпульсного оборудования [5, 6].

Основные технологические схемы комбинированной ЭГИ штамповки деталей с фланцем из полых цилиндрических заготовок представлены на рисунке 1. Деформирование заготовки с предварительной обрезкой может осуществляться с использованием универсальных разрядных камер с вынесенной за пределы очага деформации зоной разряда (рис. 1, а и б). Отбортовка концов полых цилиндрических заготовок производится при расположении разрядной камеры над заготовкой (а) или метанием жидкости (б). Для концентрации энергии в очаге деформации при штамповке пространственных заготовок используются отражатели различной формы [5, 6, 7]. Процесс раздачи, обрезки и последующей отбортовки может осуществляться также с иницированием разряда взрывающимся проводником (проволочкой) в межэлектродном пространстве (рис. 1, в).

Современные методы расчета и моделирования [8–12] позволяют адекватно описывать различные технологические процессы импульсного нагружения. Однако, ввиду влияния на ЭГИ процесс значительного ряда различных факторов, отсутствие рекомендаций по проектированию технологии комбинированной электрогидроимпульсной штамповки полых деталей с фланцем сдерживает ее широкое применение в промышленности. В первую очередь это связано с неопределенностью момента обрезки заготовки на режущей кромке ножа, т. е. отсутствием формализованного условия перехода одного этапа деформирования в другой.



**Рис. 1.** Способы ЭГИ штамповки деталей с фланцем из тонкостенных цилиндрических заготовок с верхним (а) и нижним (б) расположением разрядной камеры, с разрядом вдоль образующей заготовки (в): 1- разрядное устройство; 2 - матрица; 3 - заготовка; 4 – отражатель; 5 - деталь; 6 - обрезной нож; 7 - кольцо; 8 - фиксирующий конус

При выполнении данной работы определены следующие задачи исследования:

- определение параметров, влияющих на процесс обрезки тонкостенной цилиндрической заготовки при схеме комбинированной электрогидроимпульсной штамповки с разрядом вдоль образующей заготовки аналитическим методом;

- обработка экспериментальных данных и получение эмпирической зависимости для фиксации момента обрезки цилиндрической заготовки на режущей кромке ножа при комбинированной ЭГИ штамповке полых деталей с плоским фланцем с последующей верификацией при помощи компьютерного моделирования в конечно-элементном комплексе LS-DYNA.

## Методы

Рассмотрим процесс электрогидроимпульсной отбортовки тонкостенной цилиндрической оболочки по технологической схеме,

представленной на рисунке 2, а. После заполнения рабочей камеры 1 водой производится накопление электрической энергии в конденсаторной батарее  $C$ , коммутация  $K$  и формирование (инициирование) с помощью взрывающегося проводника 2 в межэлектродном промежутке ионизированного токопроводящего канала. Под действием переменного импульсного давления, возникающего в результате выделения электрической энергии в осевом канале разряда, часть заготовки 3, расположенная ниже опорного кольца 4, деформируется в кольцевой зазор, образованный ножом 5 и матрицей 6. При реализации данной технологии необходимо обеспечить герметичность и высокую стойкость изоляции 7 электродной системы. При выполнении разделительных операций большое значение имеет индуктивность  $L$  разрядного контура 8, определяющая скорость выделения энергии в канале разряда.

Процесс деформирования заготовки при комбинировании операций, указанных выше, можно условно разбить на три этапа:

1. Формовка поперечного рифта (гофра) на оболочке вращения между режущей кромкой (РК) ножа 5 и матрицей 6 с радиусом скругления  $r_m$ . Деформирование заготовки происходит до тех пор, пока прогиб (стрелка прогиба) гофра не достигнет такого значения  $f_{np}$  (рис. 2, б), при котором толщинная деформация на режущей кромке ножа будет равна критической.

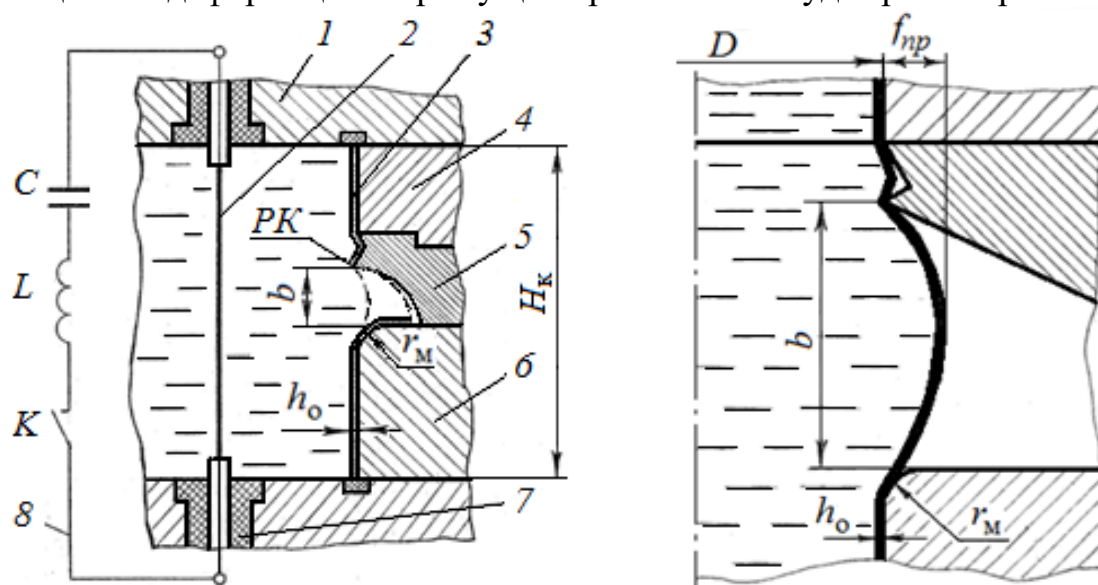


Рис. 2. Технологическая схема процесса электрогидроимпульсной штамповки тонкостенной цилиндрической заготовки с осевым разрядом: а) формообразование фланца; б) момент обрезки заготовки на режущей кромке ножа.

2. Обрезка заготовки на режущей кромке, сопровождающаяся, как показано экспериментальными исследованиями, например, в работе [13], резким падением до нуля давления, действующего на заготовку.

3. Отбортовка свободной (неограниченной матрицей) заготовки под действием сил инерции. Кинетическая энергия, приобретенная деформирующейся частью заготовки к моменту ее разделения на режущей кромке ножа должна быть достаточна для полного формообразования фланца.

Численная реализация расчетной модели при моделировании комбинированной ЭГИ штамповки деталей с фланцем требует задания момента разделения заготовки на режущей кромке ножа, т. е. условия перехода одного этапа деформирования в другой [13, 14]. Существуют два подхода к решению этого вопроса. В первом случае начало разделения заготовки определяют по предельным толщинным деформациям  $\varepsilon_{hкр}$ . Данный метод обусловлен тем, что в условиях плоского напряженного состояния материала заготовки ( $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  - растягивающие напряжения и  $\sigma_3 = 0$ ) толщинная деформация  $\varepsilon_h$  приблизительно равна величине интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$ , с предельным значением которой связан момент разделения.

Недостатком такого подхода по определению условия разделения заготовки является то, что толщинная деформация  $\varepsilon_h$  фиксируется после разделения заготовки на режущей кромке.

Более корректным является второй подход, где начало разделения оценивают величиной максимального (предельного) прогиба заготовки, которая в конечном итоге при ЭГИ отбортовке будет влиять на ширину получаемого фланца детали. Кроме того, материал заготовки, имеющий предельный прогиб комплексно учитывает напряженно-деформированное состояние, в то время как критическая интенсивность деформаций неоднозначно определяет прогиб деформирующейся части заготовки, соответствующий моменту обрезки на режущей кромке ножа.

Поэтому при комбинированной ЭГИ штамповке начало обрезки тонкостенной цилиндрической заготовки на режущей кромке кольцевого ножа будем оценивать ее предельным прогибом  $f_{пр}$  (рис. 2, б). В качестве параметра, характеризующего положение заготовки в данный момент, принимаем отношение прогиба деформируемой части заготовки к ширине зазора между режущей кромкой и матрицей  $\overline{f_m} = f/b$ .

Угол заточки режущей кромки обрезающего ножа принимали равным  $30^\circ$ , так как это значение угла является оптимальным в разделительных процессах при импульсном нагружении [5, 14].

## Результаты

Анализ разделительных операций, в том числе в совмещенных процессах, при импульсном нагружении [5, 13, 14], а также предварительно проведенные эксперименты позволили установить, что на величину

предельного прогиба деформирующейся части заготовки существенное влияние оказывает относительное удлинение материала при растяжении  $\delta_{10}$ , геометрические параметры технологической оснастки (радиус закругления матрицы  $r_m$ , зазор  $b$ ) и заготовки (толщина  $h_0$  и исходный диаметр  $D_0$ ). Очевидно, что на процесс разрушения материала на режущей кромке ножа влияет ряд других факторов, например, трение, анизотропия материала заготовки и другие. Кроме того, на качество обрезки, несомненно, влияет удельная скорость нарастания электрической мощности, определяемая параметрами разрядного контура. Однако в данном случае эти факторы не учитываются и считаются неконтролируемыми.

В качестве параметра отклика принят безразмерный комплекс  $f_{пр}/b$ , а целью проводимых исследований являлось получение зависимости вида:

$$Y_m = f_{пр}/b = f(\delta_{10}; h_0/b; r_m/b; b/D)$$

Диапазоны варьирования параметров;  $\delta_{10} \in [0,08; 0,385]$ ;  $h_0/b \in [0,016; 0,215]$ ;  $r_m/b \in [0,67; 1,01]$ ;  $b/D \in [0,05; 0,15]$ .

Применение теории планирования эксперимента, позволяет получить математическую модель, описывающую экспериментальные данные в конкретной области с заданной погрешностью. При этом рассматривался план типа  $2^4$ , в котором каждый фактор  $X_i$  принимает значения только на концах интервала варьирования. При проведении полного факторного эксперимента типа  $2^4$  контролируются факторы  $X_1 = \delta_{10}$ ;  $X_2 = h_0/b$ ;  $X_3 = r_m/b$  и  $X_4 = b/D$ , которые варьировались на следующих уровнях:  $X_1^- = 0,08$ ;  $X_1^+ = 0,385$ ;  $X_2^- = 0,016$ ;  $X_2^+ = 0,2$ ;  $X_3^- = 0,067$ ;  $X_3^+ = 1,0$ ;  $X_4^- = 0,05$ ;  $X_4^+ = 0,15$ . Первому фактору соответствовали материалы сварных заготовок сталь 20 (нагартованная) и латунь Л63М. На каждом уровне плана проводилось по 8 измерений. Результаты экспериментов, проведенных на электрогидроимпульсном прессе ПЭГ-25, приведены в таблице 1.

После обработки данных полного факторного эксперимента типа  $2^4$  с использованием дисперсионного и регрессионного анализов была получена эмпирическая зависимость относительного предельного прогиба заготовки от параметров материала, геометрических размеров заготовки и технологической оснастки (см. рис. 1):

$$f_{пр}/b = 0,307(\delta_{10})^{0,447} \cdot (h_0/b)^{-0,352} \cdot (r_m/b)^{0,295} \cdot (b/D)^{0,114}$$

**Таблица 1.** Результаты полного факторного эксперимента типа  $2^4$  по определению критического прогиба заготовки при комбинированной ЭГИ штамповке цилиндрических оболочек

| №<br>п/п | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | Прогиб $Y_{i,j}$ |       |       |       |       |       |       |       |           |
|----------|-------|-------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|          |       |       |       |       | 1                | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | $\bar{Y}$ |
| 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6                | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14        |
| 1        | 0,08  | 0,016 | 0,067 | 0,05  | 0,158            | 0,136 | 0,137 | 0,116 | 0,141 | 0,146 | 0,135 | 0,128 | 0,137     |
| 2        | 0,385 | 0,016 | 0,067 | 0,05  | 0,281            | 0,341 | 0,296 | 0,271 | 0,256 | 0,268 | 0,251 | 0,242 | 0,275     |
| 3        | 0,08  | 0,2   | 0,067 | 0,05  | 0,053            | 0,059 | 0,049 | 0,048 | 0,064 | 0,056 | 0,064 | 0,046 | 0,055     |
| 4        | 0,385 | 0,2   | 0,067 | 0,05  | 0,111            | 0,100 | 0,096 | 0,128 | 0,112 | 0,118 | 0,107 | 0,122 | 0,112     |
| 5        | 0,08  | 0,016 | 1,0   | 0,05  | 0,318            | 0,314 | 0,329 | 0,339 | 0,299 | 0,322 | 0,326 | 0,306 | 0,319     |
| 6        | 0,385 | 0,016 | 1,0   | 0,05  | 0,547            | 0,523 | 0,422 | 0,547 | 0,740 | 0,738 | 0,499 | 0,674 | 0,588     |
| 7        | 0,03  | 0,2   | 1,0   | 0,05  | 0,146            | 0,134 | 0,111 | 0,117 | 0,114 | 0,118 | 0,117 | 0,155 | 0,126     |
| 8        | 0,385 | 0,2   | 1,0   | 0,05  | 0,237            | 0,252 | 0,235 | 0,223 | 0,286 | 0,281 | 0,225 | 0,248 | 0,248     |
| 9        | 0,08  | 0,016 | 0,067 | 0,15  | 0,152            | 0,186 | 0,106 | 0,147 | 0,179 | 0,151 | 0,144 | 0,145 | 0,151     |
| 10       | 0,385 | 0,016 | 0,067 | 0,15  | 0,279            | 0,343 | 0,258 | 0,324 | 0,289 | 0,378 | 0,274 | 0,304 | 0,306     |
| 11       | 0,08  | 0,2   | 0,067 | 0,15  | 0,063            | 0,060 | 0,071 | 0,073 | 0,055 | 0,066 | 0,056 | 0,055 | 0,062     |
| 12       | 0,385 | 0,2   | 0,067 | 0,15  | 0,136            | 0,116 | 0,131 | 0,138 | 0,139 | 0,145 | 0,154 | 0,151 | 0,139     |
| 13       | 0,08  | 0,016 | 1,0   | 0,15  | 0,336            | 0,254 | 0,296 | 0,366 | 0,401 | 0,381 | 0,355 | 0,305 | 0,337     |
| 14       | 0,385 | 0,016 | 1,0   | 0,15  | 0,669            | 0,740 | 0,643 | 0,798 | 0,720 | 0,691 | 0,703 | 0,763 | 0,716     |
| 15       | 0,08  | 0,2   | 1,0   | 0,15  | 0,180            | 0,128 | 0,124 | 0,165 | 0,137 | 0,130 | 0,119 | 0,152 | 0,142     |
| 16       | 0,385 | 0,2   | 1,0   | 0,15  | 0,304            | 0,266 | 0,196 | 0,249 | 0,278 | 0,290 | 0,309 | 0,279 | 0,272     |

Расхождение между опытными данными и вычисленной величиной  $f_{пр}/b$  не превышает 8 % для всех точек плана, а средняя погрешность аппроксимации ниже 5 %. Экспериментальные исследования проведены также для материалов (сталь 12Х18Н10Т и сплав АМг2М), невошедших в план эксперимента, Расхождение между расчетными  $Y_m$  и опытными значениями исследуемой величины не превышает 10 % (см. табл. 2), что подтверждает корректность полученной эмпирической зависимости в выбранном диапазоне варьируемых факторов.

**Таблица 2.** Оценка корректности полученной зависимости по определению критического прогиба заготовки при комбинированной ЭГИ штамповке цилиндрических оболочек

| №<br>п/п | Материал           | $\vec{X}$ |       |       |       | $\bar{Y}$ | $Y_m$ | $\frac{(\bar{Y} - Y_m) \cdot 100\%}{Y_m}$ |
|----------|--------------------|-----------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------------------------------------------|
|          |                    | $X_1$     | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ |           |       |                                           |
| 1        | Латунь<br>Л63М     | 0,385     | 0,2   | 1     | 0,15  | 0,272     | 0,284 | -4,5                                      |
|          |                    |           | 0,016 | 0,067 | 0,05  | 0,275     | 0,274 | 0,1                                       |
| 2        | Сталь 30           | 0,08      | 0,2   | 1     | 0,15  | 0,143     | 0,141 | 0,8                                       |
|          |                    |           | 0,016 | 0,067 | 0,05  | 0,137     | 0,136 | 0,6                                       |
| 3        | Сталь<br>12Х18Н10Т | 0,31      | 0,03  | 0,5   | 0,1   | 0,353     | 0,332 | 9,9                                       |
|          |                    |           | 0,03  | 0,3   | 0,1   | 0,330     | 0,337 | 1,9                                       |
| 4        | Сплав<br>АМг2М     | 0,15      | 0,1   | 0,3   | 0,1   | 0,144     | 0,159 | 9,4                                       |
|          |                    |           | 0,06  | 0,2   | 0,1   | 0,190     | 0,173 | -8,9                                      |

Для верификации использовалось компьютерное моделирование плоской задачи разделения и отбортовки в конечно-элементном комплексе LS-DYNA. Поскольку программа позволяет решать упрощенную задачу без внесения существенной погрешности [15], задавалась геометрия комбинированной матрицы, участка трубной заготовки и жидкой передающей среды (воды), импульсное нагружение задавалось положительной полуволной синусоиды [16].

Для оснастки, заготовки и передающей среды использовались типы элементов *PLANE 162*. Для матрицы использовалась модель материала *RIGID* со следующими свойствами: модуль Юнга  $E = 200$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; плотность  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Для передающей среды использовалась модель материала *ELASTIC\_FLUID* со следующими свойствами: плотность  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,49$ ; модуль объемной упругости  $K = 2.2$  ГПа.

Для трубной заготовки из стали 12X18H10T диаметром 96 мм и толщиной стенки 0,3 мм задавалась модель материала *STANDART\_PIECEWISE\_LINEAR* со следующими свойствами: плотность  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ ; модуль Юнга  $E = 190 \text{ ГПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,29$ ; напряжение текучести  $\sigma_s = 474.4 \text{ МПа}$ ; касательный модуль, определяющий кривизну кривой деформационного упрочнения на пластическом участке при линейной аппроксимации  $B = 2322.5 \text{ МПа}$ , предельная пластическая деформация  $\varepsilon_p^f = 0.35$ , используемая в качестве критерия разрушения материала. При расчете с применением модели материала заготовки *STANDART\_PIECEWISE\_LINEAR*, любой конечный элемент, достигший предельной пластической деформации, считается разрушенным и удаляется из расчета, тем самым моделируя разделение материала.

Результаты моделирования представлены на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 представлены этапы компьютерного моделирования: рисунок 3, *а* демонстрирует начальное положение заготовки и оснастки до приложения нагрузки; рисунок 3, *б* показывает момент, когда завершается разделение заготовки по толщине режущей кромкой; рисунок 3, *в* и *г* демонстрируют этапы заполнения матрицы под действием нагрузки; рисунок 3, *г* показывает конечным момент расчета.

Рисунок 4 подробно демонстрирует этапы внедрения в материал режущей кромки и стадии разделения: рисунок 4, *а* – начальное положение заготовки и оснастки; рисунок 4, *б* – начало внедрения режущей кромки в поверхность материала; рисунок 4, *в* – последующее внедрение инструмента в заготовку; рисунок 4, *г* – конечный этап резки, полное отделение одной части материала заготовки от другой.

При этом аналитический расчет показал, что  $f_{\text{пр}}/b = 0,262$ , а расчет по данным компьютерного моделирования показал  $f_{\text{пр}}/b = 0,258$ . Следовательно, погрешность составляет около 1,5%, что допустимо для инженерных расчетов.

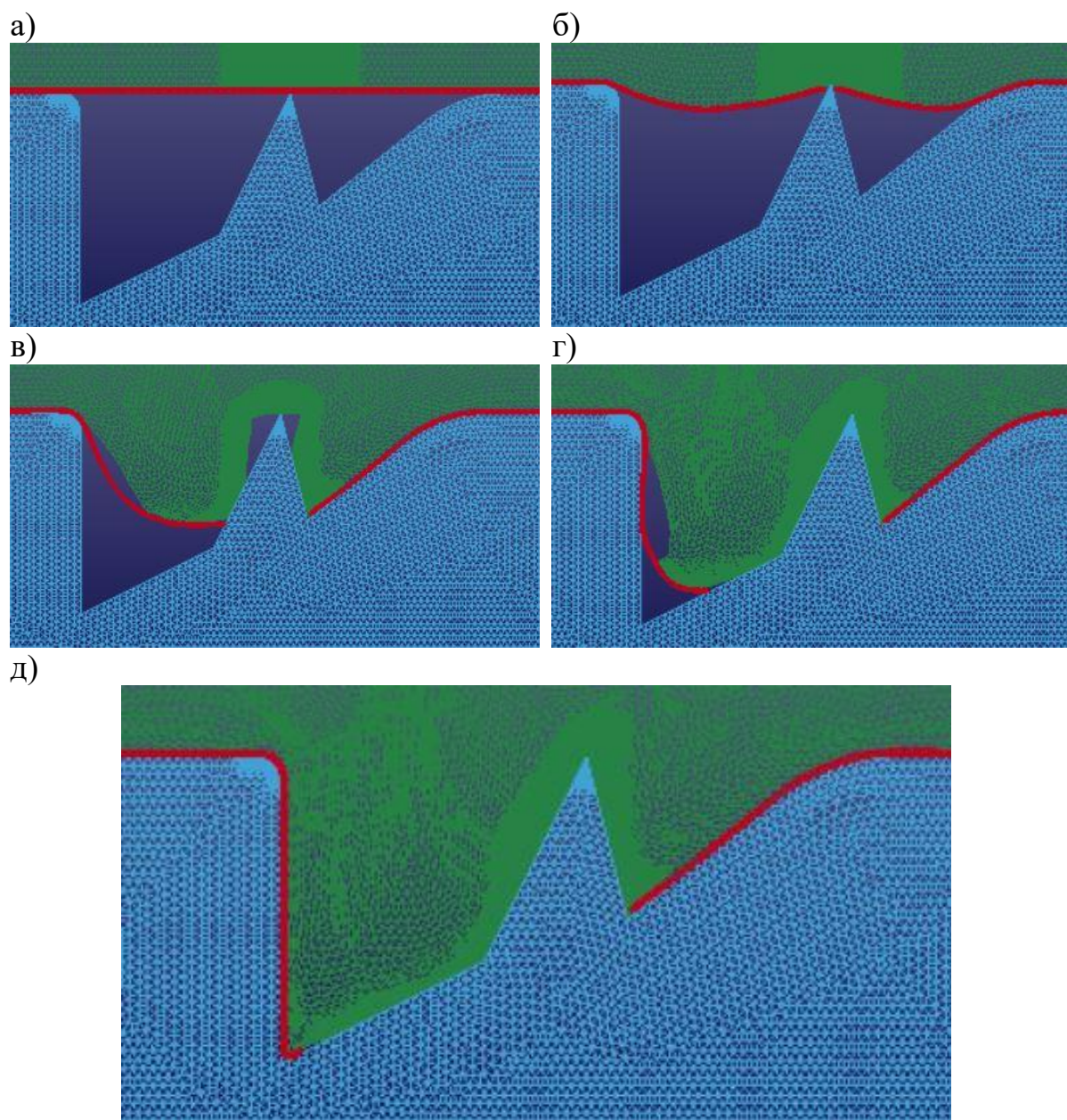
## Обсуждение

Применение зависимости предельного прогиба заготовки  $f_{\text{пр}}/b$  позволяет определить момент разделения цилиндрической оболочки на режущей кромке ножа и выполнить переход от этапа формообразования криволинейного поперечного рифта и отбортовке свободной, неограниченной матрицей, части заготовки.

Получена эмпирическая зависимость для предельного прогиба деформирующейся части заготовки перед обрезкой в процессе

комбинированной ЭГИ штамповки от параметров материала, геометрических размеров заготовки и оснастки.

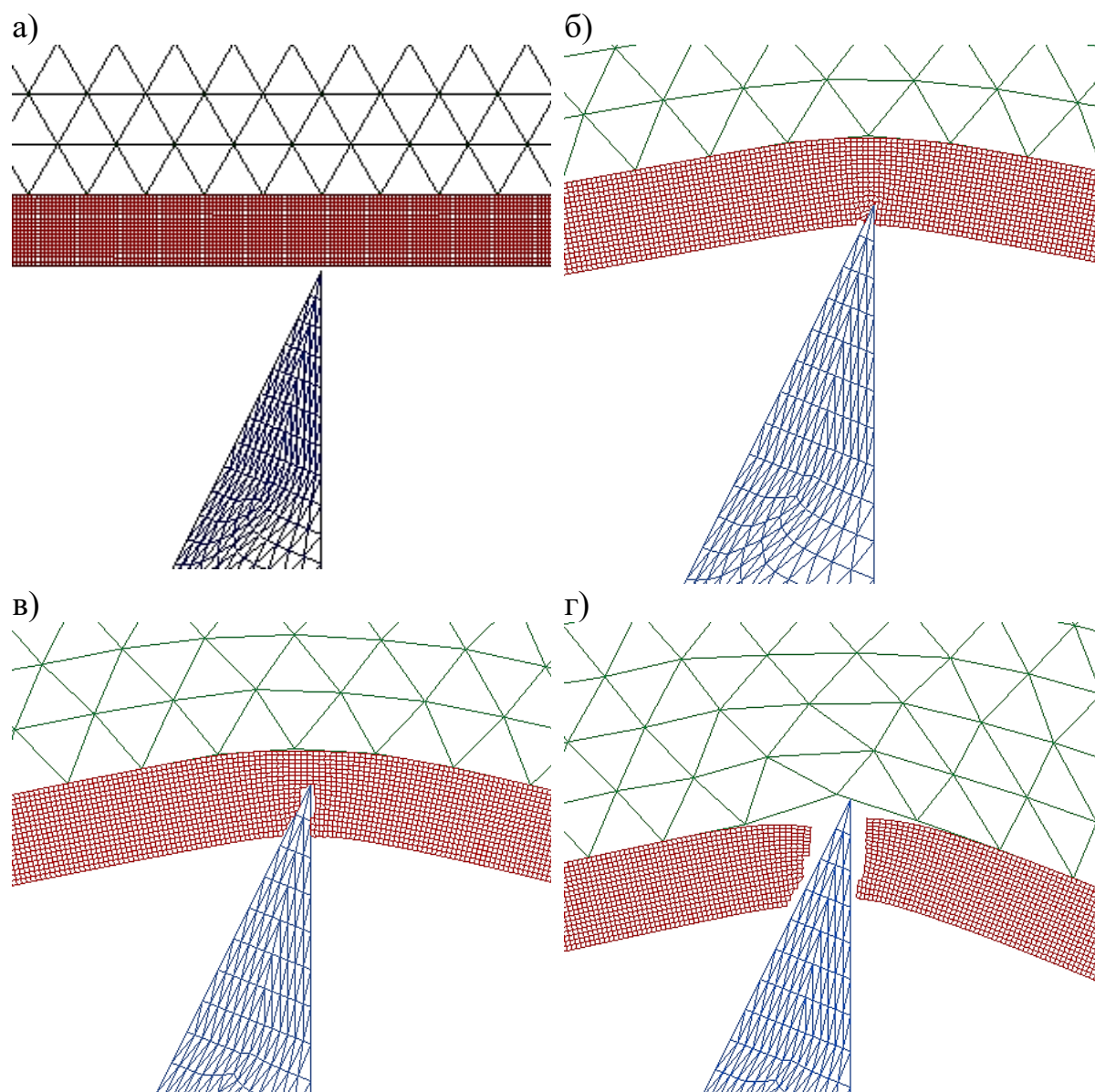
Проведено компьютерное моделирование процесса в конечно-элементном комплексе LS-DYNA на примере резки-отбортовки трубной заготовки из стал 12X18H10T с толщиной стенки 0,3 мм, которое показало сходимость с аналитическими расчетами с погрешность в 1.5%.



**Рис. 3.** Этапы компьютерного расчета комбинированного процесса ЭГИ разделения и формовки

Полученные результаты создают предпосылки для практического проектировании новых высокопроизводительных технологических

процессов и дальнейшего исследования комбинированной ЭГИ штамповки цилиндрических оболочек.



**Рис. 4.** Этапы разделения заготовки режущей кромкой при компьютерном моделировании

## Заключение

Анализ результатов исследований комбинированной ЭГИ штамповки цилиндрических оболочек показывает, что применение в расчетных моделях полученной эмпирической зависимости предельного прогиба деформирующейся части заготовки перед обрезкой позволяет проводить моделирование исследуемых процессов.

Предварительный аналитический расчет позволит снизить количество компьютерных расчетов для отладки технологии, связанные с многофакторностью процесса ЭГИ штамповки, что в перспективе сократит время разработки новой технологии и подготовки производства.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследовательских работ и разработки новых технологических процессов ЭГИ штамповки тонкостенных пространственных деталей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков: Изд-во ХАИ, 2011. 272 с.
- [2] Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования металлов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
- [3] Atieh S., Carvalho A.A., Santillana I.A. et all. First results of SFR cavity fabrication by electro-hydraulic forming at CERN. Proceedings of SFR 2015. Whistler. BC. Canada. Pre-press Release 25 sept. 2015. P. 1-7.
- [4] Zia M., Fazli A., Soltanpour M. Warm electrohydraulic forming: A novel high speed forming process. Procedia Engineering. 2017; 207: 323–328. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.782.
- [5] Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении. / Чачин В.Н., Богоявленский К.Н., Вагин В.А. и др. Минск : Наука и техника. - 1987, 231 с.
- [6] Гулый Г.А., Малюшевский П.П, Кривицкий Е.В. и др. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта. М. : Машиностроение, 1977. 320 с.
- [7] Мазуровский Б. Я., Сизёв А. Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. Киев : Наукова думка, 1983. - 192 с.
- [8] Мамутов В.С., Мамутов А.В. Моделирование канала высоковольтного разряда в воде при электрогидроимпульсной штамповке. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 6-й Международной научно-практической конференции. 2017. С. 656-665.
- [9] Мамутов В.С., Арсентьева К.С., Блажевич В.В., Калатошишвили И.В. Замкнутый компьютерный расчет электрогидроимпульсной штамповки. В сборнике: Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России. СПб, 2022. С. 188–192.
- [10] Mamutov V.S., Arsentyeva X.S., Kalatozishvili I.V. Pressure on Thin Sheet Blank in Discharge Chamber During Electrohydropulsed Stamping. A. N. Evgrafov (Ed.): MMESE 2022, LNME, pp. 49-56, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30027-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30027-1_7)

- [11] Wei Y., Zhang F., Wei B., Xu H., He K. Experimental and numerical analyses of tubular electrohydraulic forming process. *Key Engineering Materials*. 2021;871:80–86.
- [12] Косенков В.М., Бычков В.М. Математическое моделирование переходных процессов в разрядном контуре и разрядной камере электрогидравлической установки. *Электронная обработка материалов*, 2015, 51(2). С. 66–72.
- [13] Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов / В.А. Вагин, Г.Н. Здор, В.С. Мамутов. Минск : Навука і тэхніка, 1990. - 206 с.
- [14] Мамутов, В.С. Компьютерное моделирование разрушения при вырубке-пробивке особо тонколистовых металлов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2012. № 2. С. 465–471.
- [15] Арсентьева К. С., Мамутов В. С. Электрогидроимпульсная вытяжка-формовка с интенсификацией течения фланца заготовки. *Металлообработка*, 2020, № 3, с. 26–34. DOI 10.25960/mo.2020.3.26
- [16] Арсентьева, К. С. Задание нагружения в расчетах специальных методов листовой штамповки / К. С. Арсентьева, Е. В. Сидорова // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России : Научные труды Высшей школы машиностроения / Под редакцией А.А. Поповича. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 164–169. – EDN ILRCFO.

X.S. Arsentyeva, V. S.Mamutov, A. O. Prostorova, V. P. Tretyakov

## **TECHNOLOGY AND COMPUTER SIMULATION OF COMBINED ELECTROHYDROIMPULSE FORMING**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

### **Abstract**

This study explores trimming conditions for thin-walled cylindrical workpieces in electrohydroimpulse forming of flanged hollow parts. An empirical relationship was obtained for the maximum deflection of the workpiece during forming an annular gap at the moment of material separation, depending on material properties, workpiece geometry, and tooling dimensions. Computer modeling of the process was performed using the finite element software LS-DYNA. The results demonstrate that electrohydroimpulse forming can combine multiple operations in a single step, including bulging, forming, trimming, punching, sizing, and flanging. This technology can be efficiently applied in the manufacturing of hollow spatial parts with flanges.

*Key words:* combined electrohydroimpulse forming, finite element analysis, LS-DYNA, high-speed forming, material fracture, thin-walled cylindrical parts.

## REFERENCES

- [1] Taranenko, M.E. (2011). *Electrohydraulic Forming: Theory, Equipment, and Processes*. Kharkiv: KhAI Publishing. 272 p. (in Russian).
- [2] Zdor, G.N., Isaevich, L.A., & Kachanov, I.V. (2010). *High-Speed Metal Forming Technologies*. Minsk: BNTU. 456 p. (in Russian).
- [3] Atieh, S., Carvalho, A.A., Santillana, I.A., et al. (2015). First Results of SFR Cavity Fabrication by Electro-Hydraulic Forming at CERN. *Proceedings of SFR 2015*, Whistler, BC, Canada. Pre-press Release, 25 Sept., pp. 1–7.
- [4] Zia, M., Fazli, A., & Soltanpour, M. (2017). Warm Electrohydraulic Forming: A Novel High-Speed Forming Process. *Procedia Engineering*, 207, 323–328. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.782>.
- [5] Chachin V.N., Bogoyavlenskii K.N., Vagin V.A. Electrohydroimpulse working of materials in machine-building. – Mn.: Science and techniques, 1987 – 231 p. (in Russian).
- [6] Gulyi, G.A., Malyushevskiy, P.P., Krivitskiy, E.V., et al. (1977). *Equipment and Technological Processes Using the Electrohydraulic Effect*. Moscow: Mashinostroenie. 320 p. (in Russian)
- [7] Mazurovskiy, B.Ya., Sizov, A.N. (1983). *Electrohydraulic Effect in Sheet Metal Forming*. Kyiv: Naukova Dumka. 192 p. (in Russian).
- [8] Mamutov, V.S., Mamutov, A.V. (2017). Modeling of a High-Voltage Discharge Channel in Water During Electrohydropulse Forming. *Modern Mechanical Engineering: Science and Education*, 6th Int. Conf. Proc., pp. 656–665. (in Russian).
- [9] Mamutov, V.S., Arsentyeva, X.S., Blazhevich, V.V., & Kalatozishvili, I.V. (2022). Closed-Loop Computer Simulation of Electrohydropulse Forming. In: *Models and Methods for Advancing Mechanical Engineering in the Digital Economy*. St. Petersburg, pp. 188–192. (in Russian).
- [10] Mamutov, V.S., Arsentyeva, X.S., Kalatozishvili, I.V. (2023). Pressure on Thin Sheet Blank in Discharge Chamber During Electrohydropulsed Forming. In: A.N. Evgrafov (Ed.), *MMESE 2022* (LNME, pp. 49–56). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30027-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30027-1_7).
- [11] Wei, Y., Zhang, F., Wei, B., Xu, H., & He, K. (2021). Experimental and Numerical Analyses of Tubular Electrohydraulic Forming Process. *Key Engineering Materials*, 871, 80–86.
- [12] Kosenkov, V.M., Bychkov, V.M. (2015). Mathematical Modeling of Transient Processes in the Discharge Circuit and Chamber of an Electrohydraulic System. *Electronnaya Obrabotka Materialov*, 51(2), 66–72. (in Russian).

- [13] Vagin, V.A., Zdor, G.N., Mamutov, V.S. (1990). *Methods for Studying High-Speed Metal Deformation*. Minsk: Nauka i Tekhnika. 206 p. (in Russian).
- [14] Mamutov, V.S. (2012). Computer Simulation of Fracture During Fine-Blanking of Ultra-Thin Sheet Metals. *Modern Mechanical Engineering: Science and Education*, 2, 465–471. (in Russian).
- [15] Arsentyeva, X.S., Mamutov, V.S. (2020). Electrohydropulse Drawing-Forming with Intensified Blank Flange Flow. *Metalworking*, 3, 26–34. <https://doi.org/10.25960/mo.2020.3.26>.
- [16] Arsentyeva, X.S., & Sidorova, E.V. (2022). Load Definition in Simulations of Special Sheet Forming Methods. In: *Models and Methods for Advancing Mechanical Engineering in the Digital Economy* (pp. 164–169). St. Petersburg: POLITECH-PRESS. EDN: ILRCFO. (in Russian).