

**М.К. КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков  
**Я.С. ЖОВНОВАТЮК**, науч. сотр., НАКУ «ХАИ», Харьков  
**В.Ю. БЕСПАЛЫЙ**, инж., НАКУ «ХАИ», Харьков  
**М. МАРАИ**, маг., НАКУ «ХАИ», Харьков

## **ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ШТАМПОВКА ГЛУБОКИХ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ЛОКАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ БОЛЬШОЙ КРИВИЗНЫ**

Выполнен анализ деформирования листовой заготовки при ее изготовлении способом электрогидроимпульсной штамповки (ЭГШ). Проведено экспериментальное исследование применимости различных специальных технологических способов при глубокой штамповке-вытяжке и калибровке локальных элементов способом ЭГШ. Сформулированы рекомендации по применению рассмотренных специальных технологических способов.

Виконано аналіз деформування листової заготівки під час її виготовлення способом електрогідроімпульсного штампування (ЕГШ). Проведено експериментальне дослідження можливості застосовування різних спеціальних технологічних способів для глибокого штампування-витягування та калібрування локальних елементів способом ЕГШ. Сформульовано рекомендації із застосовування розглянутих спеціальних технологічних способів.

Deformation analysis of sheet blank during its manufacturing by electrohydraulic impact forming (EHF) was made. Experimental investigation of manufacturing techniques applicability for EHF deep-drawing and local elements calibration was realized. Recommendations of manufacturing techniques application were given.

### **1. Анализ проблемы**

Способ ЭГШ относится к импульсным методам обработки с нежесткой передающей средой и поэтому он отличается от традиционной штамповки в инструментальных штампах механизмом деформирования листовой заготовки. При традиционной глубокой вытяжке жесткий пуансон плотно прилегает к поверхности заготовки, что создает большие силы трения, предотвращающие деформацию центральной зоны заготовки. В дальнейшем центральная зона лишь немного деформируется к концу процесса вытяжки.

При штамповке с нежесткой передающей средой листовая заготовка не соприкасается с жесткими поверхностями вплоть до конца процесса, что сопровождается возникновением напряжений растяжения, очень высокими в центральной зоне, в то время как на периферию воздействуют напряжения растяжения и сжатия. Это приводит к значительному утонению заготовки вдоль радиуса с максимумом в центральной точке, что снижает пластичность материала.

Эти различия двух методов штамповки (с жестким и нежестким инструментом) очевидны при производстве полусферических деталей (рис. 1).

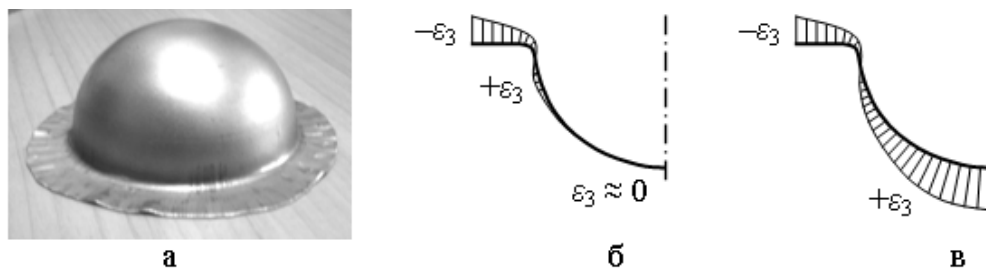


Рис. 1. Полусферическая листовая деталь (а) и схемы распределения утонений ( $\varepsilon_3$ ) при традиционной штамповке в инструментальных штампах (б) и при ЭГШ (в)

При дальнейшей штамповке способом ЭГШ локальных донных элементов малого радиуса листовой детали материал терпит разрыв вследствие низкой способности к пластическому деформированию.

Целью данной работы является исследование различных технологических способов, применяемых при ЭГШ, для обеспечения достаточной пластичности листового материала вдоль донных элементов для дальнейшего формообразования локальных элементов большой кривизны без разрывов.

## 2. Экспериментальное исследование

Существуют различные специальные технологические методы при ЭГШ позволяющие предотвратить чрезмерное утонение листового металла в центральной зоне заготовки и обеспечить достаточную пластичность для дальнейшего формообразования локальных элементов: реверсивная штамповка-вытяжка с использованием дополнительной оснастки; оптимизация полей давления; оптимизация формы заготовки; применение ковриков и другие.

Для проведения технологических исследований выбраны две алюминиевые детали «отражатель светильника» с локальными элементами большой кривизны. Эти листовые детали имеют похожие геометрические параметры (длина, ширина, глубина, ширина фланцев, толщина стенок), однако отличаются ориентацией локальных элементов: у первой детали ребра расположены перпендикулярно линии симметрии, а у второй – параллельно. Эти конструктивные особенности позволяют определить общие и частные особенности проектирования процесса производства данных деталей способом ЭГШ.

Эксперименты проведены на экспериментальной электрогидравлической установке УЭГШ-2, оборудованной конической разрядной камерой с одной парой электродов и генератором импульсных токов с рабочим напряжением до 40 кВ.

### 2.1 Схема эксперимента

Все эксперименты выполнялись с помощью разрядной камеры с конической отражающей поверхностью (рис. 2). Прижимная плита 7, переходная плита 5 и резиновая диафрагма 6 (сухой процесс) прикреплялись к фланцу камеры шпильками. Центровка камеры с прижимной плитой относительно матрицы 9 осуществлялась двумя штифтами. Толщина прижимных плит

и глубины матриц обеих деталей примерно равны и, следовательно, дистанции от разрядного канала до плоской заготовки и дна матрицы также примерно одинаковы. Разрядный промежуток (расстояние между концами электродов) также выдерживался примерно равным для всех экспериментов и равнялся 20 мм. Данный размер промежутка обеспечивает высокую эффективность разряда в широком диапазоне зарядных напряжений (от 12 кВ до 30 кВ). Емкость зарядного контура составляла 33,2 мкФ с получаемой энергией разряда от 2,4 кДж до 14,9 кДж.

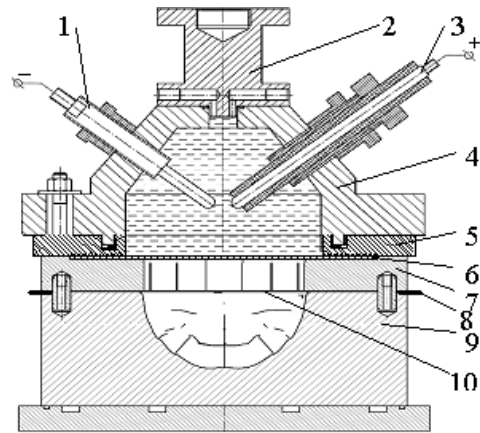


Рис. 2. Схема эксперимента для ЭГШ отражателей светильника: 1. Массовый (отрицательный) электрод; 2. Проставка для подачи воды и удаления воздуха; 3. Изолированный (положительный) электрод; 4. Разрядная камера; 5. Переходная плита; 6. Резиновая диафрагма; 7. Прижимная плита; 8. Установочный элемент; 9. Матрица; 10. Листовая заготовка

## 2.2 Реверсивная штамповка с применением дополнительной оснастки

Первым подходом к решению проблемы чрезмерного утонения центральной части заготовки было применение предварительной матрицы, которая позволяет осуществить процесс глубокой вытяжки и сформировать центральный выступ на заготовке без его существенного утонения (рис. 3). Большие силы трения вдоль контактных поверхностей выступа матрицы и заготовки предотвращают большое утонение. На следующем этапе штамповки в окончательную матрицу выступ на заготовке выворачивается давлением и происходит формовка и калибровка локальных элементов без разрывов.

Применение предварительных матриц также оправдано в случае слишком малого для глубокой вытяжки перетяжного радиуса. Для дальнейших экспериментов применяли традиционную глубокую вытяжку в матрицу окончательной формы.

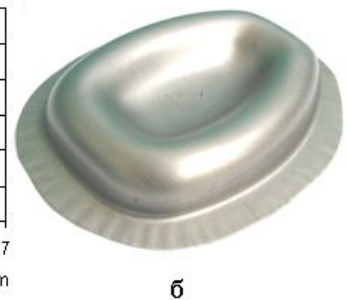
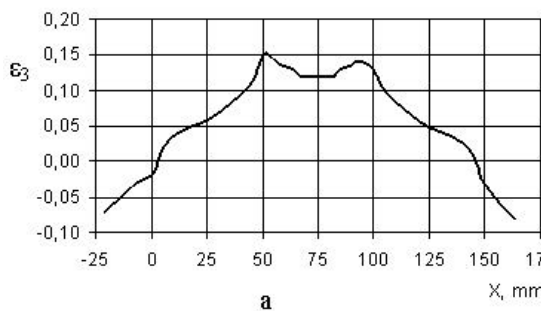


Рис. 3. Распределение утонений  $\epsilon_3$  вдоль среднего сечения (а) и заготовка (б), отштампованная по предварительной матрице

## 2.3 Оптимизация полей давления

Влияние на распределение давления, создаваемого разрядной камерой с одной парой электродов, по поверхности заготовки определяется следующими факторами: формой выходного отверстия; формой отражающих поверхностей; расположением электродов относительно выходного отверстия и отражающих поверхностей; расстоянием от электродов до заготовки и т.д. При использовании

многоэлектродных разрядных блоков имеются более гибкие средства управления полем давления: схема подключения электродов, энергия, выделяемая в каждом разрядном промежутке и другие [1].

Все эти факторы в данной работе постоянны, за исключением относительного положения (ориентации) канала разряда (определяемого положением электродов) по отношению к продольной оси матрицы (штампующей детали).

Проведенные ранее эксперименты по измерению полей давления многоместными мембранными датчиками давления (рис. 4), показали, что максимальные значения генерируются каналом разряда вдоль поперечного сечения, проходящего через среднюю точку (координата  $y = 0$ ). Распределение давления вдоль оси электродов неравномерно с малыми значениями непосредственно под электродами (зоны затенения).

Испытывали две схемы: 1) с ориентацией оси электродов вдоль оси симметрии матрицы и 2) с перпендикулярной ориентацией. Первая схема оказалась лучшей в связи с более предпочтительным распределением давления для эллиптической конфигурации штампующих деталей.

#### 2.4 Оптимизация формы заготовки

Форма заготовки (ширина фланцев заготовки вдоль вытяжных поверхностей матрицы) сильно влияет на процесс глубокой вытяжки. Чем больше ширина фланца, тем труднее деформирование материала фланца (втягивание в полость матрицы) с дальнейшим образованием участков листовой заготовки, более расположенных к избыточному растяжению.

В результате это приводит к недопустимому утонению листового материала. Обе исследуемые детали имеют сравнительно широкий конструктивный фланец, и эта дополнительная ширина еще более усложняет процесс глубокой вытяжки.

Задача состоит в том, чтобы организовать процесс таким образом и выбрать заготовку такой формы, чтобы максимально подать листовой материал в полость матрицы (избегая складкообразования) и, по возможности, сохранить начальную толщину листа для формообразования локальных элементов.

По форме заготовки для обеих деталей близки к эллипсу, но с разными радиусами по обоим концам длинной оси. При отработке процесса размеры заготовки и ее расположение изменялись много раз, т.е. вопрос правильного расположения заготовки оказался очень важным. В серийном производстве эта

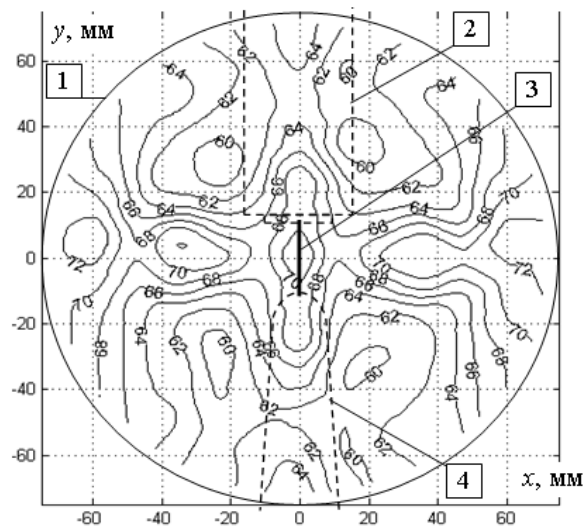


Рис. 4. Типовое поле давления (МПа), создаваемое конической разрядной камерой: 1. Контур выходного отверстия; 2. Изолированный (положительный) электрод; 3. Канал разряда; 4. Массовый (отрицательный) электрод

проблема обычно решается изготовлением ступеньки вокруг плоской вытяжной поверхности матрицы. В экспериментальной штамповке широко используются рамочные шаблоны. Оба типовых решения по установке заготовки довольно дорогие. В этой работе было разработано и апробировано установочное приспособление из двух тонких призм (V-образной формы) (см. рис. 2, поз. 8). Толщина призм равна толщине листовой заготовки (для предотвращения влияния на процесс глубокой вытяжки) и их положение определялось формой, размерами и желаемым расположением заготовки. Призмы обычно используются при обработке резанием для установки круглых или фасонных поверхностей с достаточно большой площадью (большой толщиной заготовки). Авторы испытали V-образные призмы для тонколистовых заготовок и получили положительные результаты.

Процесс оказался очень чувствительным к точности заготовки. Так, при отклонениях размеров заготовки  $\pm 2$  мм, детали часто оказывались бракованными. Повышение точности до  $\pm 1$  мм значительно увеличило количество годных деталей.

Все экспериментальные работы, связанные с формой, размерами и расположением заготовки позволили получить хороший процесс глубокой вытяжки и окончательную ширину фланцев, сравнимую с конструктивными фланцами для обеих деталей.

### 2.5 Применение ковриков

У первой детали ребра (локальные элементы малого радиуса – 1 мм) расположены по дну перпендикулярно оси симметрии. Такое расположение ребер не препятствует процессу глубокой вытяжки и поэтому донная часть заготовки имела достаточную толщину и пластичность для формовки и калибровки малых радиусов без разрывов.

Во второй детали ребра расположены, в основном, вдоль боковых стенок. Боковые ребра в матрице создают препятствия для подачи материала фланца в полость матрицы. Таким образом, на этих участках заготовки возникало чрезмерное утонение и разрывы на стадии формовки и калибровки ребер.

С целью решения данной проблемы применен другой технологический способ – установка резинового коврика на ребра в матрице (рис. 5), позволяющий выполнить процесс глубокой вытяжки (резина не создает больших сил трения) и сформировать предварительную форму ребер с большими радиусами и достаточной толщиной листа в этом месте. Дальнейшая формовка и калибровка доказали эффективность данного решения: окончательно ребра получены без разрывов.

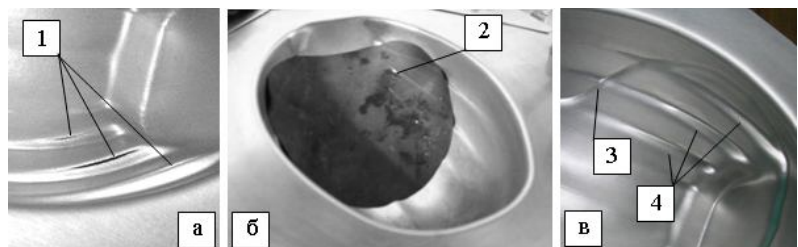


Рис. 5. Участок отштампованной детали с разрывами вдоль ребер (а), резиновый коврик в полости матрицы над ребрами (б) и участок детали, отштампованный с резиновым ковриком (в): 1. Разрывы; 2. Резиновый коврик; 3. Ступенька, образованная ковриком; 4. Ребра большего радиуса на заготовке

### **3 Анализ результатов экспериментов**

Применение дополнительной оснастки для реверсивной штамповки доказало свою эффективность. Утонение в центре заготовки (используемой для формообразования ребер) небольшое (см. рис. 3). Два пика по утонению  $\varepsilon_3 \leq 0,15$  возникли из-за взаимного воздействия напряжений растяжения и изгибающего момента на радиусах бобышки матрицы, однако такие значения не критичны для высокопластичного алюминиевого листа. Однако дополнительная оснастка требует дополнительных производственных затрат.

В разрядных камерах с одной парой электродов возможности управления распределением давления ограничены. В данной работе оптимизация поля давления осуществлялась за счет выбора правильного расположения электродов (канала разряда) относительно оси симметрии полости матрицы. Также для управления распределением давления могут использоваться отражатели и концентраторы ударных волн и гидротоков.

Существующие способы проектирования формы и размеров заготовки не дают точных результатов. Поэтому для каждого процесса штамповки, особенно при ЭГШ, технологи вынуждены опытным путем подбирать ее форму и размеры для обеспечения высокой стабильности процесса глубокой вытяжки и, следовательно, высокого качества листовых деталей. При ЭГШ процесс глубокой вытяжки чувствителен к форме и точности заготовки и ее расположению относительно полости матрицы. V-образные призмы, разработанные и апробированные авторами, показали свою полезность и пригодность для точной установки заготовки плавного эллиптического контура.

Хорошим решением является применение резиновых ковриков, позволяющих избежать изготовления дополнительной матрицы (и дополнительных расходов) с большими радиусами по локальным элементам (в нашем случае – ребрам) для предварительной штамповки этих элементов без разрывов.

Результаты испытаний специальных технологических способов позволили настроить процесс штамповки и изготовить листовые детали без разрывов и с удовлетворительным распределением утонений (рис. 6). Максимальное утонение по генеральной форме, за исключением ребер, достигло относительно небольшого значения 0,3 (при условии использования вышерассмотренных способов), а максимальное утонение 0,52 по локальным элементам расположено на перегибе ребер (вертикальные элементы). Здесь также необходимо принять во внимание эффект сверхпластичности [2].

### **4 Выводы**

Список специальных технологических способов, рассмотренных в данной работе, неполон и может быть значительно расширен. Однако даже этот ограниченный набор технологических способов позволяет изготовить ЭГШ

качественные листовые детали сравнительно большой глубины с локальными элементами малого радиуса. Однако не стоит забывать, что данная технология экономически эффективна в единичном и мелкосерийном производстве. Дальнейшие технологические исследования связаны с формообразованием металлических листов с большой степенью деформации, изменениями пластичности металлов, методами предотвращения перегрева листовых металлов из-за нагрева быстро сжимаемого воздуха.

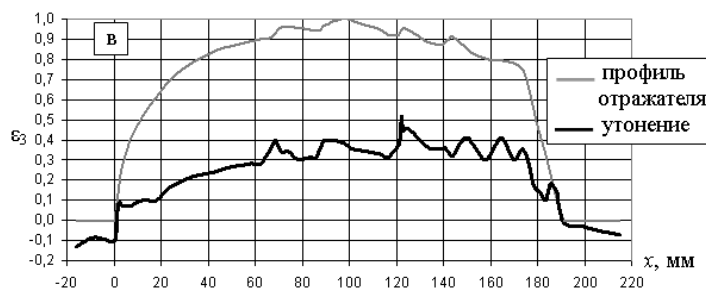
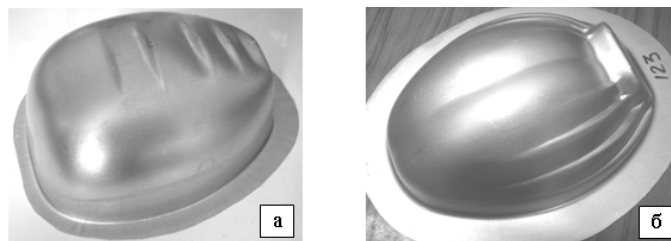


Рис. 6. Окончательные формы отражателей светильника с поперечными ребрами (а) и продольными ребрами (б) и распределение утонений  $\epsilon_3$  в продольном сечении детали с поперечными ребрами (в)

**Список литературы:** 1. *Knyazyev M.K.* Measurements of Pressure Fields with Multi-Point Membrane Gauges at Electrohydraulic Forming / *M.K. Knyazyev, Ya.S. Zhovno-vatyuk* // Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming, March 9-10 [2010]. – Columbus, Ohio, 2010. – P. 75-82. 2. *Thomas J.D.* Forming Limits for Electromagnetically Expanded Aluminum Alloy Tubes: Theory and Experiment / *J.D. Thomas, M. Seth, G.S. Daehn, J.R. Bradley, N. Triantafylidis* // Acta Mater. – 2007. – No. 55. – P. 2863-2873.

Поступила в редколлегию 06.12.2011

УДК 620.22:669.24

*А.В. КОРОБКО*, ст. преп., ЗНТУ, Запорожье

### К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ МАРКИ ВОЛОКОН ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТОВ, ФОРМИРУЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Осуществлен анализ проволок из высокожаропрочных тугоплавких металлов и сплавов на их основе для упрочнения композиционных материалов с металлическими матрицами, применяемых для изготовления тонкостенных насадков сопловых блоков ракетных двигателей. Показано, что в качестве армирующих волокон целесообразно использовать отожженную вольфрамовую проволоку марки ВР273ВП.

Проведено аналіз дроту із високожароміцних металів і сплавів на їх основі для зміцнення композиційних матеріалів з металевими матрицями, які використовуються для виготовлення тонкостінних насадків соплових блоків ракетних двигунів. Показано, що у якості армуючі волокон доцільно використовувати відпалений вольфрамовий дріт марки ВР273ВП.

The analysis of high-temperature wire of refractory metals and their alloys for hardening of composite materials with metal matrices used for the manufacture of thin-walled nozzles blocks of rocket engines. It is shown that as the fiber reinforcement is advisable to use annealed tungsten wire VR273VP brand.