

©Калюжный А.В.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗ СТАЛИ 20 СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ИЗДЕЛИЯ «БАЛЛОН»**

### **1. Введение**

В настоящее время в разных областях промышленности и домашнего хозяйства широко применяются емкости для нагревания воды типа «Баллон». Данные изделия или их составные части в большинстве случаев изготавливают методами листовой штамповки. Листовая штамповка дает возможность получать легкие изделия и, благодаря упрочнению металла при деформировании, исключается дальнейшая термическая обработка изделий для выдерживания соответствующего давления в баллонах. В существующих источниках по определению параметров технологических процессов листовой штамповки, в частности вытяжки и отбортовки, расчеты сводятся к определению количества переходов для получения необходимой геометрической формы изделий и определению силовых режимов [1-2]. Практически отсутствуют данные по определению механических свойств сформированного металла для указанных процессов. Поэтому, актуальным является использование современных методов для проведения численных экспериментов, которые дают возможность определять силовые режимы, конечную геометрию изделий и величины упрочнения сформированного металла. На кафедре МПМ и РП НТУУ «КПИ» создана информационная технология для проектирования процессов холодной объемной штамповки и формообразующих операций листовой штамповки. Она основана на создании математических моделей и проведении моделирования указанных процессов на базе метода конечных элементов (МКЭ) и разработанного пакета прикладных

программ. Моделирование МКЭ способом начальных напряжений позволяет определить упруго-пластическое состояние металла при холодном деформировании из исходного состояния заготовки до получения конечной формы изделия с учетом конструктивных (геометрическая форма деформирующего инструмента), технологических (степень деформации, форма заготовки, тип смазки, смещение деформирующего инструмента, разгрузка после пластической деформации) и физико-механических (упругие свойства материала, диаграмма истинных напряжений, диаграмма пластичности) факторов, которые влияют на формообразование изделий. Информационная технология позволяет получить все данные для проектирования технологии деформирования и штамповой оснастки: силовые режимы, точное распределение удельных усилий на деформирующем инструменте, конечные размеры изделия с учетом разгрузки, степень упрочнения сформированного металла для прогнозирования или обеспечения механических свойств по объему заготовки.

## **2. Цель статьи**

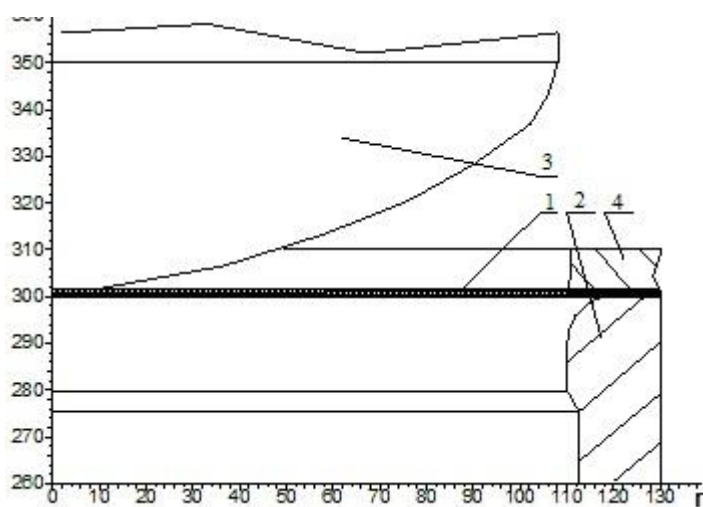
Целью данной работы было на основе численных экспериментов разработать технологический процесс получения составных деталей изделия «Баллон» объемом  $0,01\text{м}^3$  с обеспеченными механическими свойствами сформированного металла в стенке изделия, спроектировать и изготовить штамповую оснастку, а также изготовить исследовательскую партию изделий.

Размеры изделия «Баллон»: внешний диаметр 220 мм, высота 300 мм. Материал – малоуглеродистая сталь толщиной 1,5 мм. Предложенный вариант получения данного изделия из двух составных деталей (две половины), которые в дальнейшем сваривали.

Составные детали изделия «Баллон» получали вытяжкой из плоской заготовки диаметром 395 мм. За одну операцию получали деталь с внешним диаметром 220 мм и высотой 150 мм. Для получения горловины в верхней составной детали изделия «Баллон» выполняли операцию отбортовки. Для

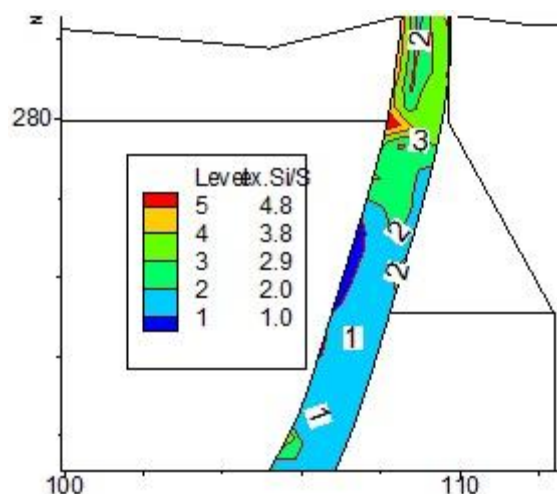
данных процессов с помощью указанного пакета программ проведено математическое моделирование МКЭ, которое позволило определить геометрические размеры деформирующего инструмента, силовые режимы процессов формообразования, конечные размеры деталей с заданными механическими свойствами деформированного металла.

На рис. 1 показана расчетная схема процесса вытяжки с прижимом, с размерами матрицы и пуансона, которые в дальнейшем обеспечили необходимое упрочнение деформированного металла. При моделировании процесса в силу симметрии рассматривали половину заготовки.



**Рис. 1** – Расчетная схема процесса вытяжки с прижимом

На рис. 2 показано распределение относительной интенсивности напряжений  $\sigma_i/\sigma_{0,2}$  в месте перехода от дна к стенке, которая позволяет оценить упрочнение металла в стенке составной детали изделия «Баллон» после деформирования. Упрочнение металла в стенке при деформировании увеличилось по сравнению с исходными свойствами материала в 2,9 раза. Таким образом, обеспечивается необходимая прочность стенки изделия. Теоретические основы МКЭ, математические модели процессов вытяжки подобных изделий были рассмотрены автором в предыдущих работах [4-5]. Далее внимание акцентировалось на получении горловины в верхней составной детали изделия «Баллон» с помощью операции отбортовки.



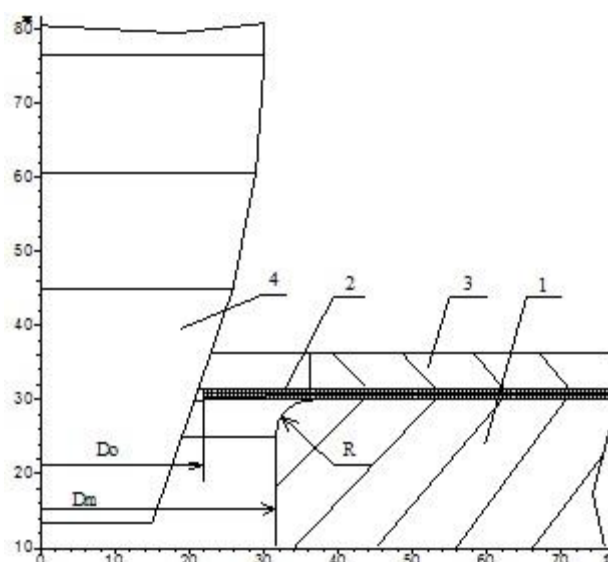
**Рис. 2** – Распределение относительной интенсивности напряжений  $\sigma_i/\sigma_{0,2}$

Отбортовка отверстий в листовых заготовках или изделиях, которые получены операциями листовой штамповки – широко распространенная операция. В частности, она используется для получения горловин. Горловины необходимы для соединения деталей с другими конструкциями путем развальцовки или с помощью резьбы.

Для решения поставленной задачи необходимо определить с помощью информационной технологии влияние радиуса закругления матрицы при отбортовке на конечную геометрическую форму горловины, напряженно-деформированное состояние в ней, упрочнение и степень использования ресурса пластичности сформированного металла. На основе данных расчетов поставлена задача разработать технологию изготовления горловины в заготовках, которые получены вытяжкой.

### **3. Результаты исследований**

Расчетная схема процесса отбортовки представлена на рис. 3 (в силу осевой симметрии показанная половина заготовки). На матрице 1 с отверстием диаметром  $D_m = 63$  миллиметра (мм) и радиусом закругления  $R$  установлена заготовка 2 толщиной 1,5 мм с предварительно выполненным отверстием диаметром  $D_o$ . На заготовке 2 размещен прижим 3.



**Рис. 3** – Схема процесса отбортовка с геометрическими размерами. Размеры представлены в миллиметрах

Отбортовка проходит с помощью пуансона 4. Деформирующий инструмент при моделировании считался абсолютно жестким. Определяли влияние радиуса закругления матрицы  $R$  на геометрическую форму горловины, напряженно-деформированное состояние и упрочнение сформированного металла при получении горловины. Величины радиуса  $R$ : 3, 5, 7 и 9 мм. Соответственно были выбраны диаметры отверстий  $D_0$  для получения одинаковой высоты горловины.: 42,24; 43,96; 45,68 и 47,4 мм. При указанных соотношениях размеров заготовки и матрицы коэффициенты отбортовки имеют следующие значения: 0,687; 0,715; 0,743 и 0,771 соответственно.

Напряжение при моделировании распределялось на определенное количество шагов или этапов и выполнялось с помощью поэтапного перемещения вертикально вниз поверхности пуансона 4. Учтена геометрия деформирующего инструмента, трение на контактирующих поверхностях, упругие свойства стали, упрочнение металла при холодном формоизменении по степенной аппроксимации диаграммы истинных напряжений, диаграмму пластичности стали с аппроксимацией формулой Г.Д. Деля, возможность разрушения металла определялась по критерию В.А. Огородникова.

На рис. 4. представлена геометрическая форма отбортованной части заготовки с учетом упругой деформации и утонения металла, которая получена для матрицы с радиусами закругления  $R$  от 3 до 9 мм. При малых радиусах  $R$  упругая деформация охватывает 2-3 мм высоты горловины. Увеличение радиуса закругления приводит к сосредоточению указанной деформации вокруг торца горловины. Также установлены величины утонения металла после отбортовки в матрицах с разным радиусом закругления. После деформации торец горловины имеет толщину 1,1-1,2 мм (исходная толщина заготовки 1,5 мм).

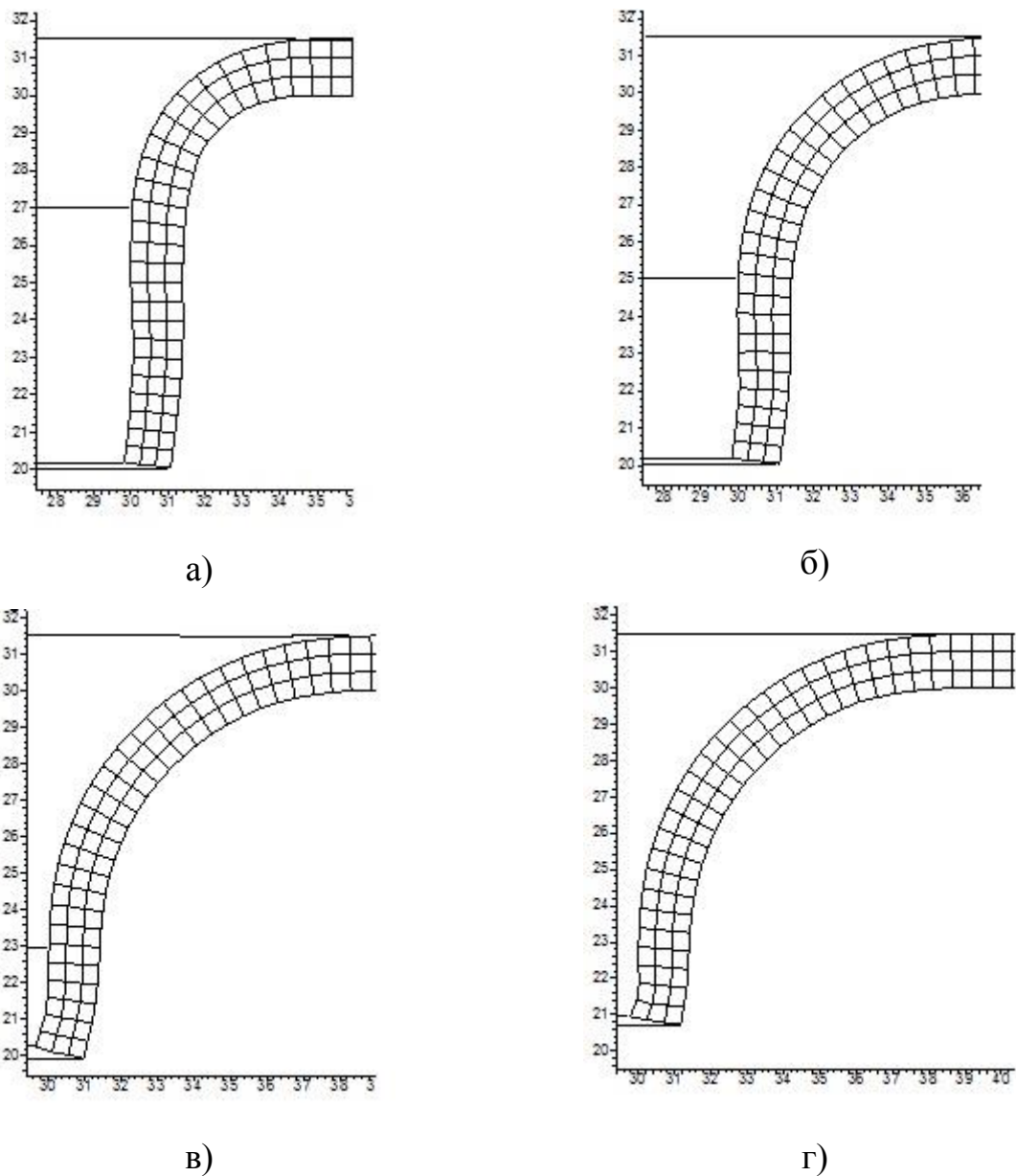
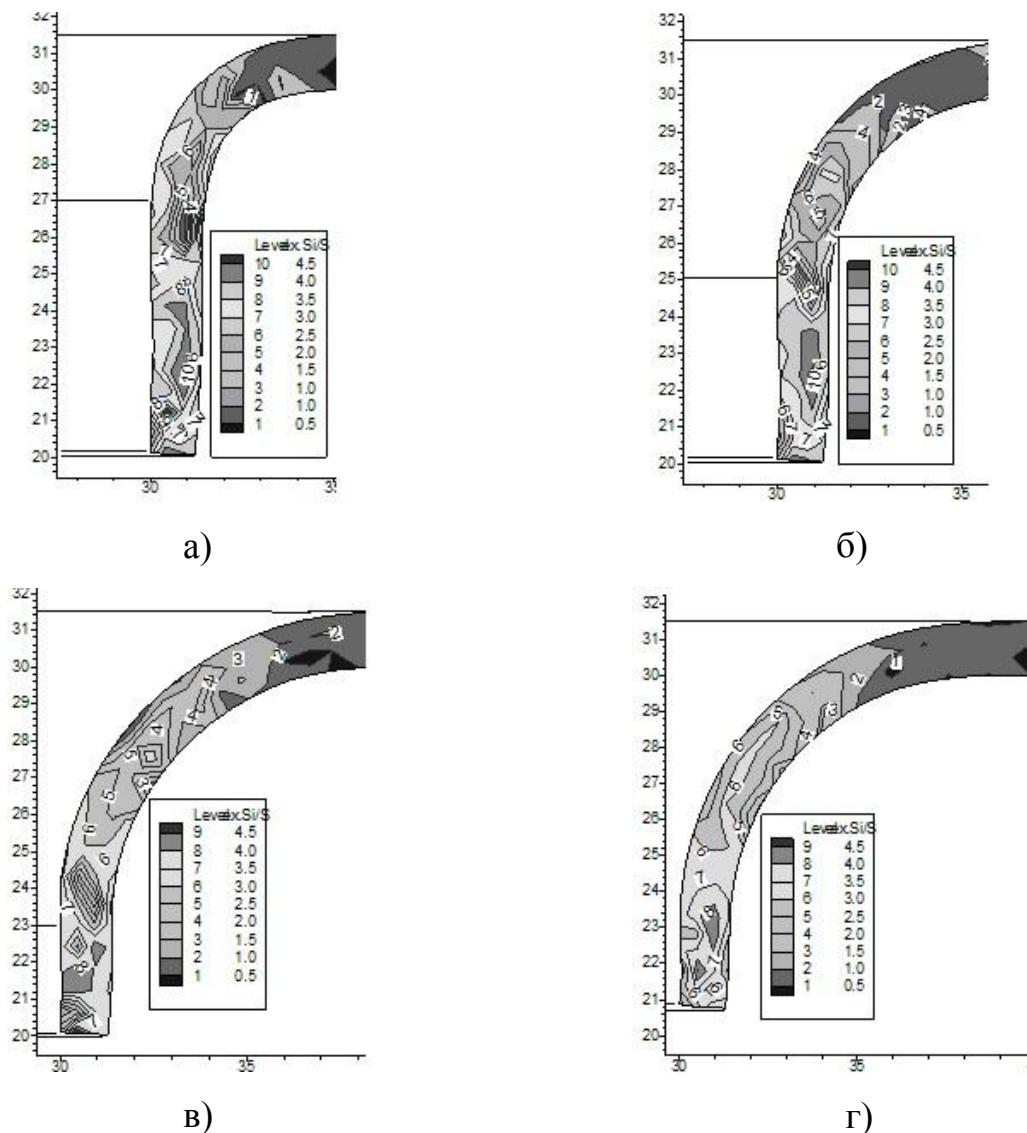


Рис. 4 – Геометрическая форма сдеформированной части заготовки после отбортовки с учетом определенной упругой деформации и упрочнения:

а)  $R = 3$  мм б)  $R = 5$  мм в)  $R = 7$  мм г)  $R = 9$  мм

Механические свойства сформированного металла оценивали по коэффициенту упрочнения (по относительной интенсивности напряжений  $\sigma_i/\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{0,2}=260$  МПа – условный предел текучести стали 20) и степени использования ресурса пластичности  $\psi$ , величина которого изменяется от 0 до 1 (при значении 1 наступает разрушение при холодном формоизменении металла).

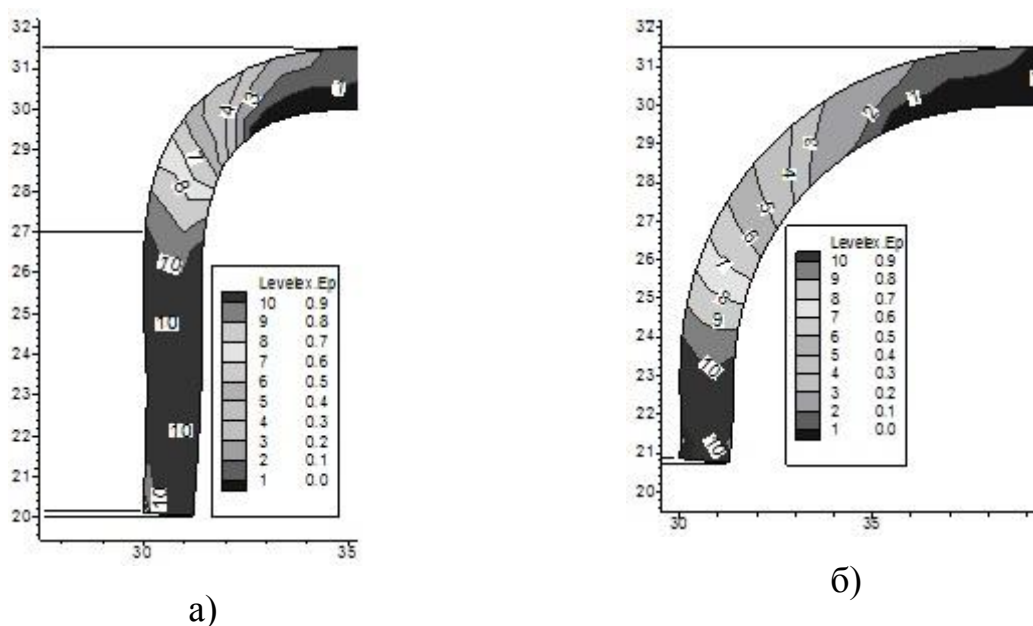
Моделированием определено упруго-пластическое напряженно-деформированное состояние по всему объему сформированной заготовки. Оно позволило определить величины  $\sigma_i/\sigma_{0,2}$  и  $\psi$ . Распределение относительной интенсивности напряжений  $\sigma_i/\sigma_{0,2}$  по объему сформированной части заготовки матрицами с разным радиусом закругления  $R$  представлено на рис. 5.



**Рис. 5** – Распределение относительной интенсивности напряжений по объему сформированной части заготовки: а)  $R = 3$  мм, б)  $R = 5$  мм, в)  $R = 7$  мм, г)  $R = 9$  мм

Из рис. 5 видно во сколько раз металл упрочняется по сравнению с исходным недеформированным состоянием. Увеличение радиуса закругления матрицы приводит к интенсивному упрочнению прямой части горловины. Таким образом, получен важный практический результат: при сравнении деталей, полученных отбортовкой с другими методами (развальцовка и пр.), то приоритетным можно считать отбортовку в матрицах с малыми радиусами закругления. Вышесказанное было использовано при изготовлении одной части изделия «Баллон».

Для примера, на рис. 6 приведено распределение степени использования ресурса пластичности  $\psi$  при отбортовке в матрицах с  $R = 3$  и  $9$  мм. Для данной стали разрушения не наступает, максимальное значение  $\psi = 0,9$ . Однако при радиусе закругления  $3$  мм такое значение  $\psi$  сдеформированного металла имеет вся прямая часть горловины.

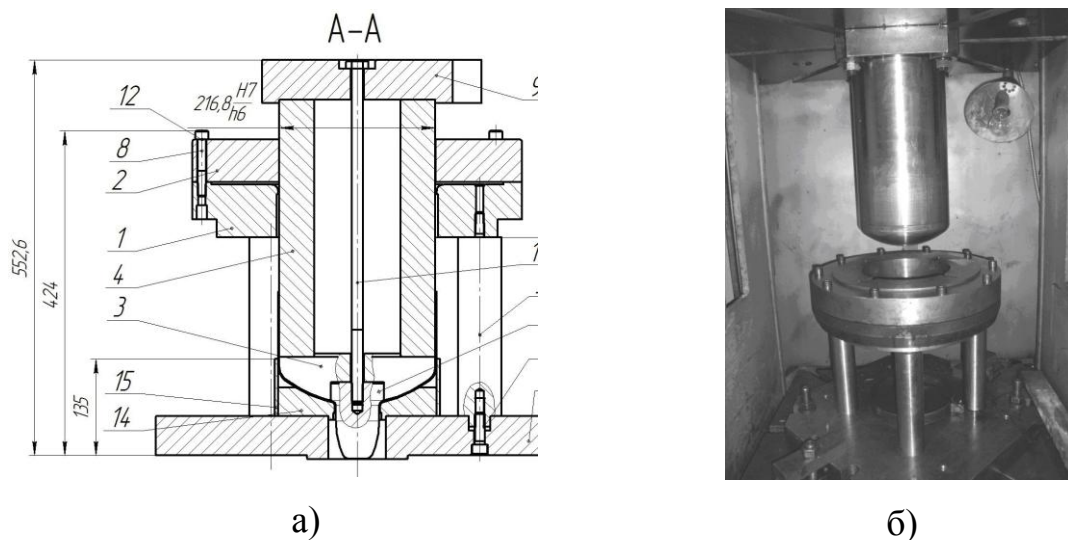


**Рис. 6** – Распределение степени использования ресурса пластичности  $\psi$  в сдеформированной части заготовки: а)  $R = 3$  мм, б)  $R = 9$  мм

Полученные расчетом данные положены в основу разработки технологии изготовления одной составной детали изделия «баллон» из малоуглеродистой стали методами вытяжки и отбортовки. На рис. 7 изображен спроектированный



(а) и изготовленный (б) универсальный штамп для вытяжки заготовки и дальнейшей отбортовки горловины.



**Рис. 7** – Спроектированный универсальный штамп для вытяжки и отбортовки (а); изготовленный штамп, установленный на гидравлическом прессе ДБ2432 усилием 1,6 МН (б)

Штамп состоит из матрицы для вытяжки 1, к которой болтами 8 закреплен жесткий прижим 2. Матрицу 1 установлено на нижнюю плиту 6 на четырех опорах 5 и закреплено винтами 11. Пуансон состоит из цилиндрической части 4, в которой установлен сферический торец 3 с пуансоном 13 для отбортовки. С помощью болта 10 составные части пуансона крепятся к верхней плите 9. Для отбортовки на нижнюю плиту 6 устанавливается матрица 14 с кольцом 15 для фиксации заготовки перед отбортовкой. В сферический торец 3 пуансона для вытяжки устанавливали пуансон для отбортовки 13. На рис. 8 показаны заготовки, которые получены вытяжкой. Комплект инструментов для отбортовки представлен на рис 9. На рис. 10 показаны заготовки после отбортовки, а на рис. 11 представлено изделие «баллон», которое получено свариванием двух составных частей.



**Рис. 8** – Заготовки,  
полученные вытяжкой



б)



в)

**Рис. 9** – Матрица а) и пуансон б) для отбортовки



**Рис. 10** – Отбортованные  
составные детали изделия «Баллон»



**Рис. 11** – Изделие «Баллон»,  
сваренное из двух полученных  
деталей

## **Выводы**

МКЭ проведено моделирование процессов вытяжки и отбортовки составных деталей изделия «Баллон». Установлено влияние радиуса закругления матрицы при отбортовке на конечную геометрическую форму заготовки, рассчитано упрочнение сформированного металла. Расчетные данные позволили разработать технологию изготовления составных частей изделия „Баллон” вытяжкой и дальнейшей отбортовкой горловины.

### **Список использованных источников:**

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
2. Ковкая и штамповка: справочник : В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / А. Ю. Аверкиев [и др.] ; ред. А. Д. Матвеев. – М. : Машиностроение, 1987. – 544 с.
3. Силові режими та якість виробів при холодному видавлюванні порожнистих виробів із сталі в умовах прикладання розтягуючого зусилля до заготовки / В. Л. Калюжний, С. Ф. Сабол, О. В. Калюжний, В. В. Піманов // Наукові нотатки : міжвуз. зб. / Луцький нац. техн. ун-т. – Луцьк, 2009. – Вип. 25, ч. 2. – С. 103-109.
4. Калюжний В. Л. Моделирование процесса вытяжки с утонением ступенчатым пуансоном заготовок из высокоуглеродистой стали / В. Л. Калюжний, О. В. Калюжний, В. В. Пиманов // Технологические системы. – 2008. – №4 (44). – С. 75–79.
5. Калюжний О. В. Досвід використання МСЕ при розрахунках процесів листового штампування / О. В. Калюжний, В. І. Стеблюк // Вестник Нац. техн. ун-та «КПИ». Сер. Машиностроение. – К., 2009. – № 56. – С. 119–127

***Калюжний А.В.*** «Моделирование методом конечных элементов процесса изготовления из стали 20 составных частей изделия «баллон».

В НТУУ «КПИ» создана информационная технология для проектирования процессов холодной объемной штамповки и формообразующих операций листовой штамповки изделий требуемой формы и заданными механическими свойствами сформированного металла путем моделирования на базе метода конечных элементов. Рассчитанные параметры и конечная геометрия изделия не требуют доработки экспериментальными работами. Показан пример разработки технологического процесса вытяжки и

последующей отбортовки отверстий на основе моделирования методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** вытяжка, отбортовка, метод конечных элементов.

**Калюжний О.В.** «Моделювання методом кінцевих елементів процесу виготовлення зі сталі 20 складових частин виробу «балон».

В НТУУ «КПІ» створена інформаційна технологія для проектування процесів холодного об'ємного штампування та формотворчих операцій листового штампування виробів необхідної форми та заданими механічними властивостями сдеформованого металу шляхом моделювання на базі методу кінцевих елементів. Розраховані параметри та кінцева геометрія виробу не потребують доробки експериментальними роботами. Показаний приклад розробки технологічного процесу витягування та подальшого відбортовування отворів на основі моделювання методом кінцевих елементів.

**Ключові слова:** витягування, відбортовування, метод кінцевих елементів.

**Kalyuzhnyy A.V.** “Modeling by finite-element method the process of manufacturing from steel 20 assembled parts of product “balloon”.

In NTUU «KPI» is created the informational technology for projection of metal forming processes of articles with demanded shape and the set mechanical properties of the deformed metal by simulation on the basis of a finite element method. Calculated parameters and final geometry of an article do not demand finishing by experimental operations.

**Key words:** the draw-forming, flanging, a finite element method.

Стаття надійшла до редакції 2 грудня 2011 р.