

УДК.621.983

Калюжный В. Л.  
Горностаев В. Н.  
Гулюк А. А.  
Олександренко Я. С.

## ГОРЯЧАЯ ШТАМПОВКА ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ЗАДАННОЙ ПРОРАБОТКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

В последнее время, для изготовления изделий с повышенной надежностью и долговечностью процессами горячей объемной штамповки, стоят задачи получения необходимой проработки структуры металла пластической деформацией по всему объему изделия или отдельных частей объема. Такая проработка обеспечивает заданные механические свойства в изделиях. Методы и термомеханические параметрыковки на молотах и горячей штамповки на прессах изделий из цветных металлов и сплавов, в том числе и высокопрочных алюминиевых сплавов, рассмотрены в работе [1]. Для операций осадки, вытяжки, прошивки, гибки приведены элементы конструирования поковок и деформирующего инструмента. Основное внимание уделено получению необходимой формы изделий. В работе [2] даны рекомендации и приведены примеры проектирования технологических процессов и штамповой оснастки для горячей объемной штамповки изделий на различном кузнечно-прессовом оборудовании. Также изложены особенности горячей объемной штамповки деталей различной формы из цветных сплавов. В приведенных источниках все сведения базируются на основании экспериментальных данных и производственного опыта, и основное внимание уделено достижению горячим формообразованием необходимой формы изделий. Практически отсутствуют рекомендации по штамповке деталей для обеспечения заданных механических свойств в деформированном металле.

Для усовершенствования существующих и разработки новых технологических процессов горячей объемной штамповки в настоящее время используют компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Моделирование позволяет устанавливать технологические параметры и определять данные для проектирования штамповой оснастки, которые не требуют доработки экспериментальными работами [3,4]. В работах [5,6] с помощью МКЭ проведены расчетные исследования процессов горячей вальцовки цилиндрических заготовок и штамповки осесимметричных. Показана возможность получения изделий с заданной проработкой структуры металла пластической деформацией. Актуальными задачами являются проведение аналогичных расчетно-экспериментальных исследований для горячей штамповки деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов.

Целью работы является расчетное определение параметров и разработка технологии горячей штамповки полых изделий из высокопрочного алюминиевого сплава В93пч с требуемой проработкой структуры металла пластической деформацией по высоте стенки.

Эскиз полого изделия из высокопрочного алюминиевого сплава В93пч приведен на рис. 1. Изделие имеет стенку разной толщины по высоте и донную часть с постоянной толщиной. В стенке изделия необходимо обеспечить заданную проработку структуры металла пластической деформацией для получения необходимых механических свойств деформированного металла после термообработки. Одним из способов получения таких изделий является вытяжка с утонением полой заготовки в конической матрице. Подбором формы исходной заготовки и величиной утонения стенки при формообразовании вытяжкой можно обеспечить заданную проработку структуры металла пластической деформацией.

Определение формы и размеров исходной заготовки, а также параметров технологии горячей штамповки выполнено компьютерным моделированием с помощью МКЭ и использованием программы DEFORM. Деформированию подвергали заготовки из сплава В93пч, которые получены литьем. Интервал штамповки согласно рекомендациям работы [1] для этого сплава составляет  $430^{\circ}$ – $350^{\circ}$ С. Скорость деформирования  $V_0 = 7$  мм/сек и коэффициент трения  $\mu = 0,15$  выбраны из условий проведения дальнейших экспериментальных исследова-

ний на гидравлическом прессе ДБ2436 с использованием смазки для горячей штамповки при температуре до 450°C LOCTITE 8191 на основе дисульфида молибдена. Моделированием необходимо было установить предварительный разогрев деформирующего инструмента для обеспечения необходимого интервала штамповки.

Результаты моделирования приведены для установленных формы и размеров исходной заготовки, которые обеспечивают необходимую проработку структуры металла пластической деформацией и заданные механические свойства в стенке полого изделия после дальнейшей термообработки. Расчетные форма и размеры исходной заготовки приведены на рис. 2.

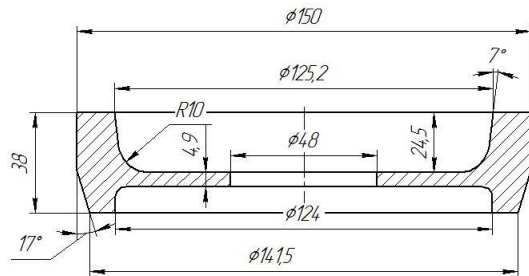


Рис. 1. Эскиз полого изделия из высокопрочного алюминиевого сплава В93пч

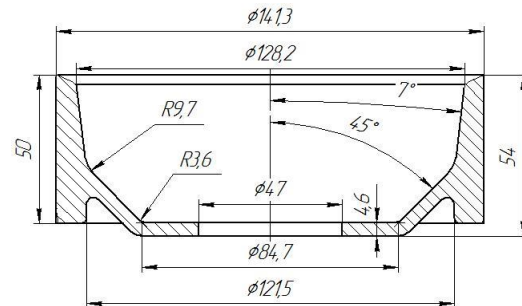


Рис. 2. Расчетные форма и размеры исходной заготовки

Расчетные положения деформирующего инструмента в разрезе приведены на рис. 3. На рис. 3, а показано положение в начале штамповки. Исходную заготовку 1 устанавливают в матрицу 2 с конической деформирующей поверхностью для проведения вытяжки с утонением. В матрице 2 располагают плиту 3 для формообразования донной части изделия. Деформирование выполняют пуансоном 4. Положение деформирующего инструмента в конце штамповки изображено на рис. 3, б. Перемещение пуансона 4 при штамповке для получения изделия 5 составляет 66 мм. Выталкивание изделия из неподвижной матрицы 2 осуществляют при помощи перемещения вверх плиты 3 (рис. 3, в).

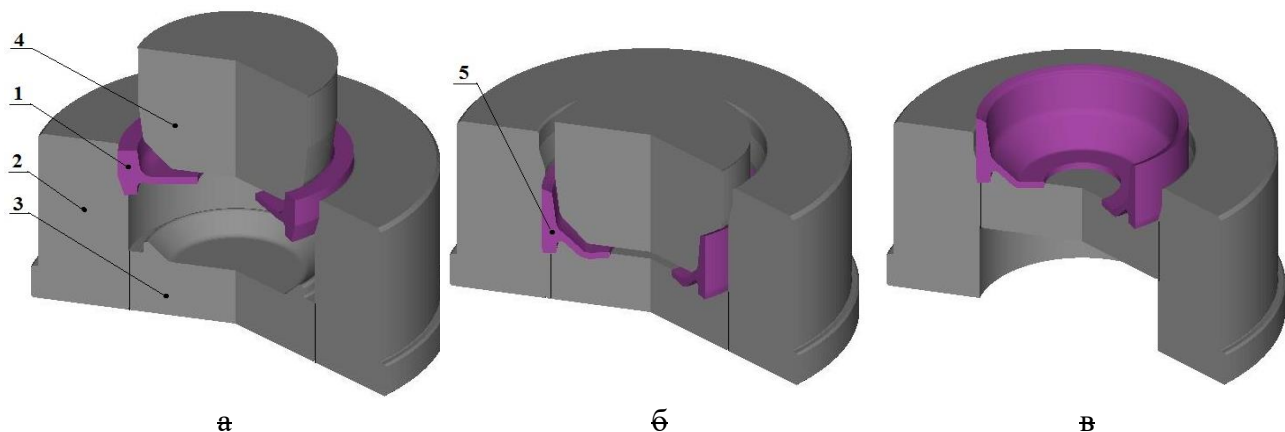


Рис. 3. Расчетные положения деформирующего инструмента в разрезе при штамповке: а – в начале штамповки, б – в конце штамповки, в – после выталкивания изделия

Силовые режимы штамповки и выталкивания изделия приведены на рис. 4. На рис. 4, а показана зависимость усилия деформирования от перемещения пуансона. На этапе штамповки заготовки вытяжкой с утонением усилие сначала возрастает и достигает максимального значения 180 кН при перемещении пуансона 30 мм, а далее усилие уменьшается до 25 кН в конце вытяжки. Затем усилие деформирования возрастает, когда начинается формообразование донной части полого изделия, и достигает величины 1400 кН в конце штамповки. Зависимости осевого и радиального усилия на матрице от перемещения пуансона приведены на рис. 4, б. Осевое усилие сначала возрастает и имеет максимум при перемещении пуансона 28 мм, затем уменьшается до минимального значения 19 кН при завершении вытяжки с утонением и увеличивается до 1390 кН в конце штамповки. Характер зависимости радиального усилия от перемещения пуансона аналогичен зависимости усилия деформи-

вания. Усилие имеет два максимума. Один величиной 510 кН получен на этапе вытяжке с утонением, а другой – 1400 кН в конце штамповки. Моделированием также установлена зависимость усилия выталкивания изделия из матрицы после штамповки от перемещения плиты (рис. 4, в). Максимальное значение 40 кН получено в начале выталкивания с последующим уменьшением до момента выхода изделия из матрицы. Приведенные данные были использованы при выборе прессового оборудования и проектировании штамповой оснастки.

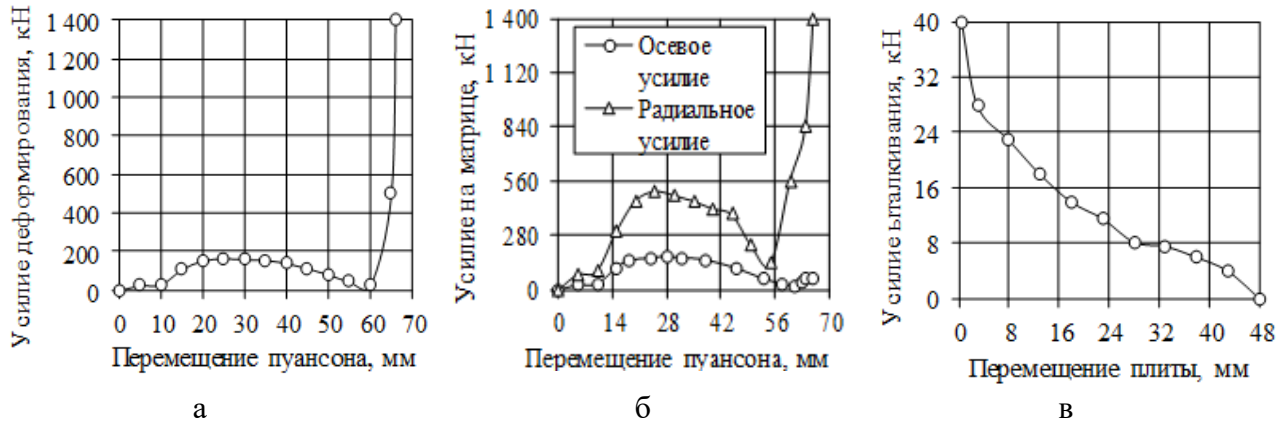


Рис. 4. Силовые режимы штамповки и выталкивания изделия:

а – зависимость усилия деформирования от перемещения пуансона, б – зависимости осевого и радиального усилия на матрице от перемещения пуансона, в – зависимость усилия выталкивания изделия из матрицы от перемещения пуансона

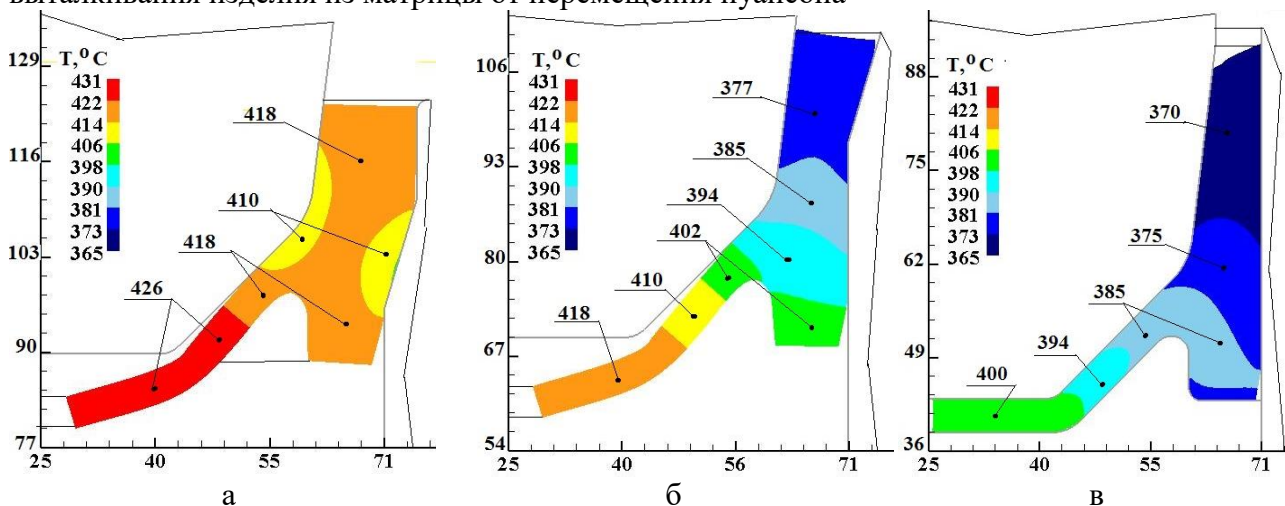


Рис. 5. Последовательность формообразования изделия с распределением температуры в сформированной заготовке:

а – при перемещении пуансона 20 мм, б – при перемещении пуансона 40 мм, в – при перемещении пуансона 66 мм. Размеры по осям приведены в миллиметрах

Последовательность формообразования изделия с распределением температуры в деформированной заготовке приведена на рис. 5. Тонкими линиями показаны пуансон и часть матрицы. На рис. 5, а изображено положение при перемещении пуансона 20 мм. Происходит деформирование заготовки на конической части матрицы и выполняется раздача с изгибом перемычки. За время деформирования 3 сек в деформированной заготовке образуются три области с разными температурами. В области стенки температура уменьшается с 430° до 410°С и 410°С, а в перемычке – до 426°С и 418°С. При перемещении пуансона 40 мм (рис. 5, б) происходит утонение стенки и увеличение высоты деформированной заготовки. При этом перемычка практически не деформируется. В области перемычки температура снижается до 402°...418°С. В стенке деформированной заготовки температура изменяется от значения 377°С в верхней части до 402°С в нижней части. На конечной стадии штамповки стенка не деформируется, а выполняется формообразование донной части полого изделия. Распределение температуры в конце штамповки приведено на рис. 5, в. Температура за время

деформирования 9,4 сек в области стенки снизилась до значений в пределах  $370^{\circ}\dots385^{\circ}\text{C}$ , а в области перемычки – до  $385^{\circ}\dots400^{\circ}\text{C}$ . Таким образом температурный интервал штамповки соблюдается при формообразовании полого изделия.

Проработку структуры металла пластической деформацией можно оценить распределением интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  по объему изделия после штамповки, которое приведено на рис. 6. В области стенки получено  $\varepsilon_i=0,26$  в нижней части и  $\varepsilon_i=0,45\dots0,64$  в остальном объеме стенки. В области перемычки интенсивность деформаций находится в пределах  $\varepsilon_i=0,26\dots0,46$ .

Для проектирования штамповой оснастки необходимо знать распределение удельных усилий на деформирующем инструменте. На рис. 7 приведено распределение нормальных напряжений на поверхностях пуансона и матрицы, которые контактируют с деформированной заготовкой и возникают при максимальном усилии штамповки. На пуансоне максимальное значение этих напряжений составляет 160 МПа, на матрице – 120 МПа.

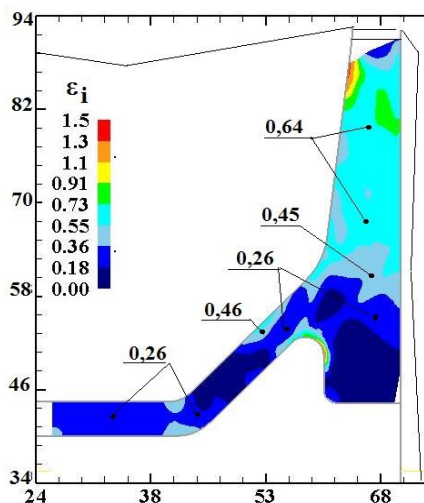


Рис. 6. Распределение интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  по объему изделия после штамповки. Размеры по осям приведены в миллиметрах

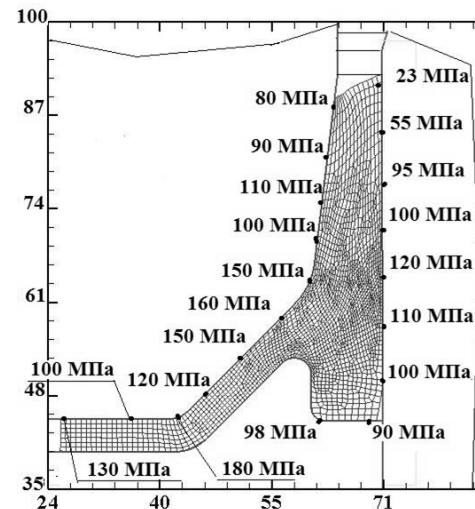


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений на поверхностях деформирующего инструмента, которые возникают при максимальном усилии штамповки. Размеры по осям приведены в миллиметрах

По результатам моделирования спроектирован и изготовлен штамп для горячей штамповки. Конструкция и фотография штампа на гидравлическом прессе ДБ 2436 усилием 4 МН приведены на рис. 8. Конструкция штампа показана на рис. 8, а. Штамп состоит из нижней плиты 1 круглой формы и пазами для крепления на столе пресса, в которой установлен толкатель 2. На нижней плите 1 размещена матрица 3 с плитой 4 и направляющим кольцом 5. Матрица 3 зафиксирована кольцом 6 и болтами 13. Пуансон 7 размещен в пуансонодержателе 8. Пуансонодержатель 8 фиксирует пуансон 7 с опорной плитой 9 к промежуточной плите 10 при помощи болтов 14. В промежуточную плиту 10 вкручены четыре шпильки 11. На шпильки установлена верхняя плита 12 и закреплена болтами 15. Фотография штампа на гидравлическом прессе ДБ2436 приведена на рис. 8, б.

Перед штамповкой, в соответствии с расчетными данными, пуансон 7, матрицу 3 и плиту 4 подогревали газовой горелкой до  $360^{\circ}\text{C}$ . Исходную заготовку с нанесенной смазкой LOCTITE 8191 разогревали в печи до  $430^{\circ}\text{C}$  и устанавливали в матрицу 3. При ходе ползуна пресса вниз происходит формообразование полого изделия. Экспериментальное значение усилия деформирования 1298 кН определяли по показаниям манометра пресса. Расхождение с расчетной величиной составило 8 %. Исходная заготовка и изделие после горячей штамповки приведены на рис. 9. На рис. 9, а показана фотография исходной заготовки. Вид на изделие со стороны полости изображен на рис. 9, б. На рис. 9, в приведен вид на изделие со стороны донной части.

Выше было отмечено, что кроме формы и размеров изделия, необходимо было получить заданные механические свойства в стенке изделия. После штамповки была выполнена термообработка изделия, сущность которой состояла в закалке и искусственном старении.



Для испытания на растяжение из стенки изделия были вырезаны стандартные образцы. В результате проведенных механических испытаний получены следующие данные: предел прочности  $\sigma_b = 510$  МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2} = 480$  МПа, относительное удлинение  $\delta = 4\%$ . Среднее значение твердости в этом месте составляет 153НВ.

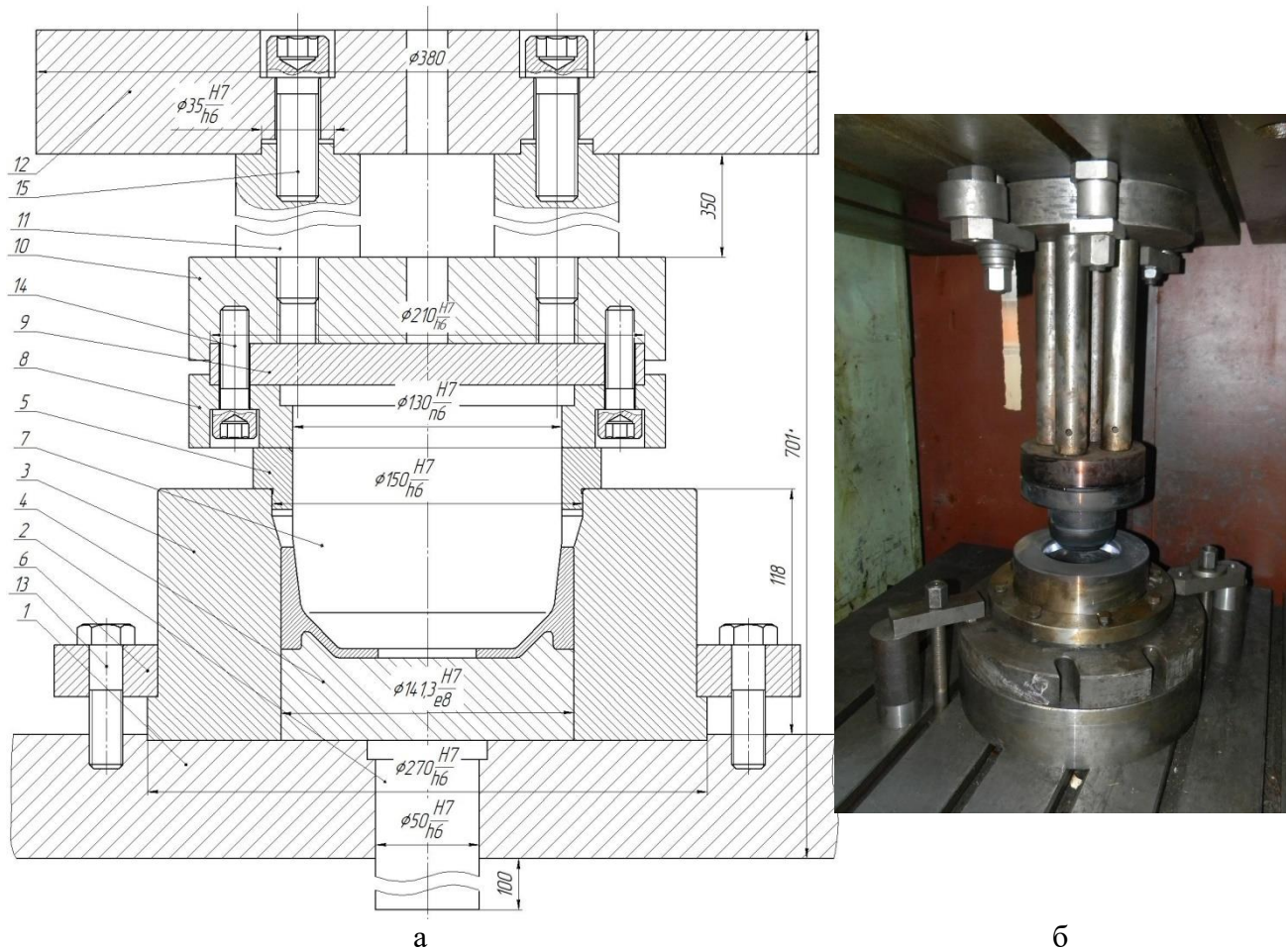


Рис. 8. Конструкция штампа (а) та фотография штампа на гидравлическом прессе ДБ 2436 (б)

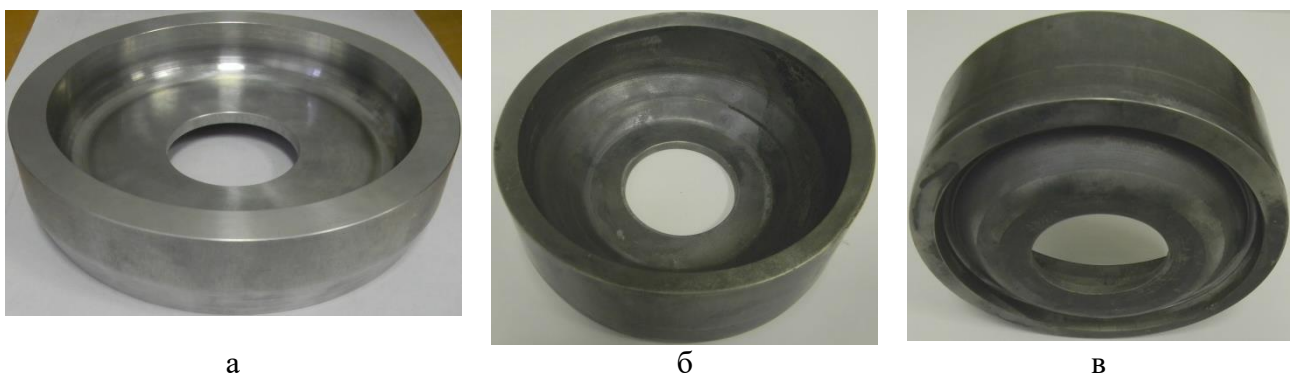


Рис. 9. Исходная заготовка и полученное изделие:  
а – исходная заготовка, б – вид на изделие со стороны полости, в – вид на изделие со стороны донной части

### ВЫВОДЫ

Моделированием методом конечных элементов установлены параметры горячей штамповки полого изделия из сплава В93пч с заданной проработкой структуры металла пластической деформацией для обеспечения механических свойств в стенке после термообработки. Моделированием определены форма и размеры исходной заготовки, температура по-

догрева деформирующего инструмента, усилие штамповки, усилие выталкивания изделия из матрицы, удельные усилия на инструменте, изменение температуры металла при формоизменении, напряженно-деформированное состояние заготовки, конечные форма и размеры изделия. По результатам расчетного анализа спроектирован и изготовлен штамп для горячей штамповки и проведены экспериментальные исследования на гидравлическом прессе. Выполнены испытания на растяжение стандартных образцов, которые вырезаны из стенки изделия после термообработки. Определены условный предел текучести, предел прочности, относительное удлинение и твердость. Данные испытаний отвечают требованиям по механическим свойствам металла в стенке изделия.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. *Ковка и штамповка цветных металлов. Справочник / Н.И. Корнеев, В.Н. Аржаков, Б.Г. Бармашенко [и др.] – М.: Машиностроение, 1971. – 232 с.*
2. *Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т/ / Ред. Совет: Е.И. Семенов (предс.), О.А. Ганаго, Л.И. Живов [и др.] – М.: Машиностроение, 1986. – Т.2. Горячая объемная штамповка / Под ред. Е.И. Семенова. – 1986. – 592 с.*
3. *Данченко В.Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, А.Н. Голово – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. – 448 с.*
4. *Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко, В.А. Гринкевич. – Днепропетровск: Системные технологии, 2008. – 448 с.*
5. *Скрябин С.А. Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок в гладких валках / С.А. Скрябин, В.Л. Калюжный, Д.С. Чайка // Вестник донбасской государственной машиностроительной академии. – Краматорск: ДГМА, 2008. – С. 147–161.*
6. *Снитко С.А. Конечно-элементное моделирование многопереходного моделирования при производстве железнодорожных колес / С.А. Снитко, В.Л. Калюжный // Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение. – К : НТУУ «КПИ», 2011. – №11. – С. 106–112.*

#### REFERENCES

1. *Kovka i shtampovka cvetnyh metallov. Spravochnik / N.I. Korneev, V.N. Arzhakov, B.G. Barmashenko [i dr.] – M.: Mashinostroenie, 1971. – 232 s.*
2. *Kovka i shtampovka: Spravochnik. V 4-h t/ / Red. Sovet: E.I. Semenov (preds.), O.A. Ganago, L.I. Zhivov [i dr.] – M.: Mashinostroenie, 1986. – T.2. Gorjachaja obemnaja shtmpovka / Pod red. E.I. Semenova. – 1986. – 592 s.*
3. *Danchenko V.N. Proizvodstvo profilej iz aljuminievyyh splavov / V.N. Danchenko, A.A. Milenin, A.N. Golovko – Dnepropetrovsk: Sistemnye tehnologii, 2002. – 448 s.*
4. *Komp'juternoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem. Chislennye metody / V.N. Danchenko, A.A. Milenin, V.I. Kuz'menko, V.A. Grinkevich. – Dnepropetrovsk: Sistemnye tehnologii, 2008. – 448 s.*
5. *Skrjabin S.A. Vlijanie vnekontaktnykh zon na ushirenie pri val'covke cilindricheskih zagotovok v gladkih valkah / S.A. Skryabin, V.L. Kaljuzhnyj, D.S. Chajka // Vestnik donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii. – Kramatorsk: DGMA, 2008. – S. 147–161.*
6. *Snitko S.A. Konechno-jelementnoe modelirovanie mnogoperehodnogo modelirovanija pri proizvods-tve zheleznodorozhnyh koles / S.A. Snitko, V.L. Kaljuzhnyj // Vestnik NTUU «KPI», Mashinostroenie. – K : NTUU «KPI», 2011. – №11. – S. 106–112.*

Калюжный В. Л. – д-р техн. наук, проф. каф. МПМиРП НТУУ «КПИ»  
Горноста́й В. Н. – канд. техн. наук, доц. каф. МПМиРП НТУУ «КПИ»  
Гулюк А. А. – инженер, ДП «Завод им. В.О. Малышева» (г. Харьков)  
Олександренко Я. С. – аспирант НТУУ «КПИ»

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев.

E-mail: kwl\_2011@ukr.net, gornvad@ukr.net, gornvad@ukr.net, oleksandrenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.02.2017 г.