

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ПЛАСТИЧЕСКОГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

*М.Ю. Семашко, В.Г. Шеркунов, Е.В. Экк, В.И. Трускоецкий, В.М. Мезенцев*

## EXPERIMENTAL STUDY OF A METHOD OF PLASTIC STRUCTURIZATION OF METALS

*M.Yu. Semashko, V.G. Sherkunov, E.V. Eck, V.I. Truskovsky, V.M. Mezentsev*

В ходе параллельных экспериментальных и компьютерных экспериментов было произведено исследование способа пластического структурообразования металлов, определены величины деформаций и потребное усилие деформирования, сделан вывод о возможности дальнейшего использования программы Deform при изучении предложенного способа.

*Ключевые слова:* экспериментальное исследование, компьютерное моделирование, натурный эксперимент, деформация, усилие, заготовка.

Method of plastic structurization of metals has been studied during parallel experimental and computers researches, degree of deformations and necessary force was defined; the conclusion is drawn on possibility of further use of the *Deform* computer program in studying of the proposed method.

*Keywords:* experimental study, computer modeling, natural experiment, deformation, force, workpiece.

Способ обработки металлов давлением, состоящий из комбинации уже известных операций свободной осадки, закрытой осадки, а также операций выдавливания [1,2], исследуемый на кафедре «Машины и технологии обработки материалов давлением» Южно-Уральского государственного университета, направлен на то, чтобы путем циклического деформирования воздействовать на структуру металла с целью ее измельчения.

Проведение натурального эксперимента является ключевым этапом в цикле научных исследований. Он позволяет на практике подтвердить или опровергнуть все возможные гипотезы и предположения.

Наиважнейшей целью исследований является выявление изменений в структуре материала заготовки, полученной в результате деформирования по предложенной схеме.

Для достижения поставленной цели в ходе экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- получение экспериментальных данных о характере формоизменения заготовки;
- определение степени деформации на каждом переходе цикла;
- определение величины усилия деформирования;
- сходимости экспериментальных данных и данных, полученных путем компьютерного моделирования.

Для проведения исследований была изготовлена технологическая оснастка, состоящая из основания, подвижной матрицы и пуансона. Исследования осуществлялись на гидравлическом прессе усилием 500 тс в лаборатории кафедры «Машины и технологии обработки материалов давлением».

В качестве экспериментальных образцов использовались отлитые свинцовые заготовки, состоящие из двух половин, на одну из которых была нанесена сетка (рис. 1). Затем заготовки подогревались в печи и соединялись при помощи сплава



Рис. 1. Заготовка для последующей обработки давлением

Вуда. Исходные размеры полученной заготовки: высота  $H = 120$  мм, диаметр заготовки  $D = 35$  мм. В качестве смазки использовано машинное масло.

Параллельно производилось моделирование процесса в программе Deform 2D.

В качестве деформируемого материала задан свинец (Lead). Размеры заготовки: высота  $H = 120$  мм, диаметр заготовки  $D = 35$  мм. Коэффициент трения принят 0,12.

Для исследований поведения металла, а также компьютерной модели на каждом переходе цикла обработки давлением осуществлялись: свободная осадка, закрытая осадка, закрытая прошивка и обратное выдавливание (рис. 2).

При перемещении пуансона на 14 мм осуществляется свободная осадка (рис. 2, а) заготовки, на этом этапе можно заключить, что в очаг деформирования попали продольные ячейки, находящиеся между 1 и 8 сечениями. Наибольшее растяжение получили поперечные ячейки  $x_1$  и  $x_2$  в районе сечений 4, 5, 6. Наибольшая величина радиальной деформации растяжения составила 0,44 (рис. 3, а). Величина усилия деформирования составила 60-70 кН.

На рис. 3, б приведены данные, полученные в пакете Deform 2D. Представленная стадия соответствует шагу № 70. Пуансон переместился на 14 мм. Очаг наибольшего растяжения расположен у оси симметрии заготовки в районе наибольшего диа-

метра. Наибольшая степень деформации 0,37. Усилие деформирования, необходимое для осуществления процесса свободной осадки, на 70 шаге составляет 56,4 кН (рис. 4, а).

Для анализа продольных деформаций был произведен замер искаженной сетки в соответствующих сечениях, на основании которого построены графики величины деформации ячеек (рис. 3, в). Согласно графикам, а также при наружном осмотре можно заключить, что наибольшие действительные деформации сжатия возникают в центре очага деформации, их максимальные значения составляют -1,00...-1,20, что возникает на высоте 11 мм от нижнего среза заготовки на второй линии от центра  $x_2$ . Сечения 3, 4 и 5 подвержены наибольшим деформациям сжатия на рассматриваемом этапе.

Величина максимальной деформации сжатия при моделировании рассматриваемого этапа в пакете Deform составляет 0,74 и находится в центре заготовки на высоте 8,35 мм (рис. 3, г).

При перемещении пуансона на 67-68 мм осуществляется стадия закрытой осадки (рис. 2, б). Особенность закрытой осадки состоит в том, что, деформируясь, металл заготовки воздействует на подвижную матрицу и тем самым поднимает ее, причем направление движения металла в этой области противоположно движению пуансона. Усилие, необходимое для осуществления процесса

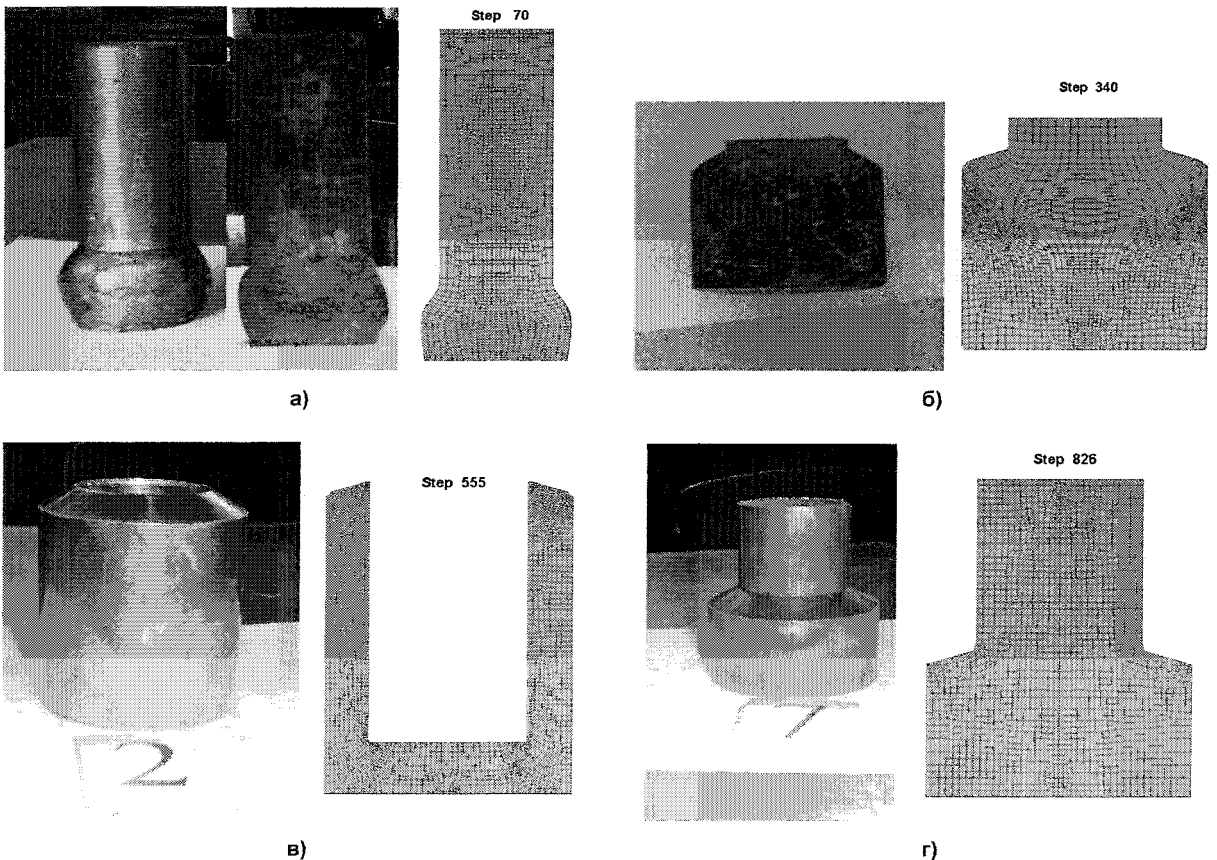
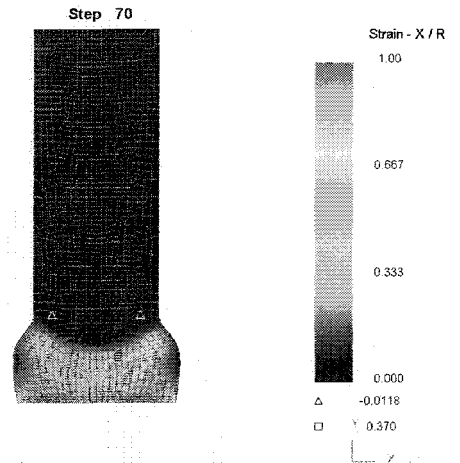


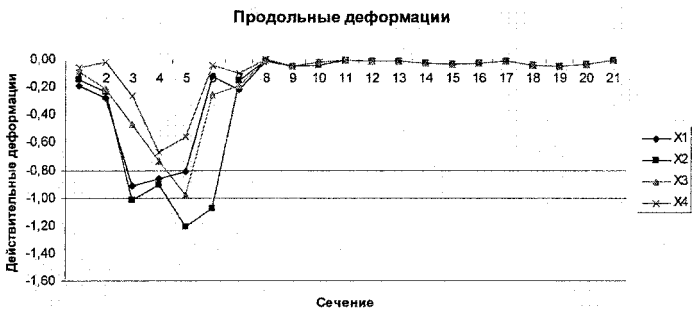
Рис. 2. Цикл исследуемого процесса: а – свободная осадка; б – закрытая осадка; в – закрытая прошивка; г – обратное выдавливание



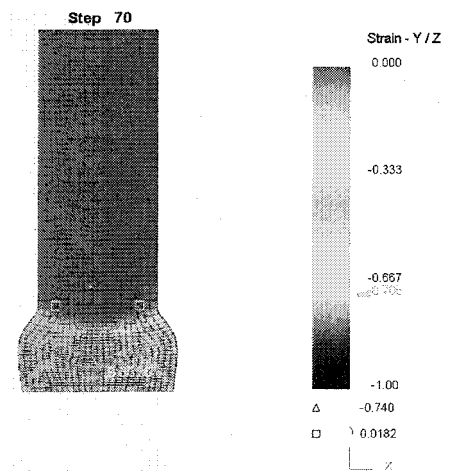
а) радиальные деформации на стадии свободной осадки (экспериментальные)



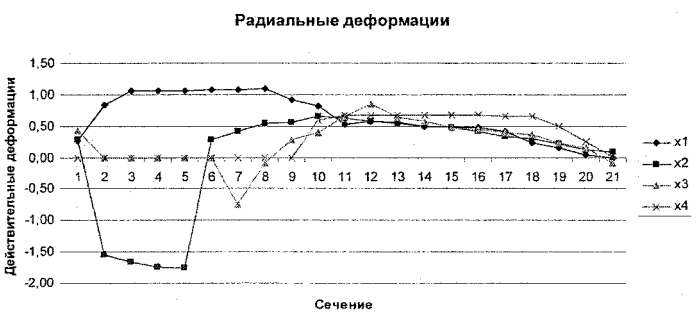
б) распределение радиальных деформаций на стадии свободной осадки в пакете Deform



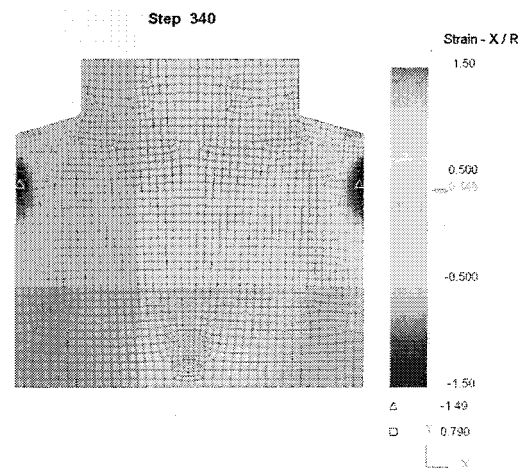
в) продольные деформации на стадии свободной осадки (экспериментальные)



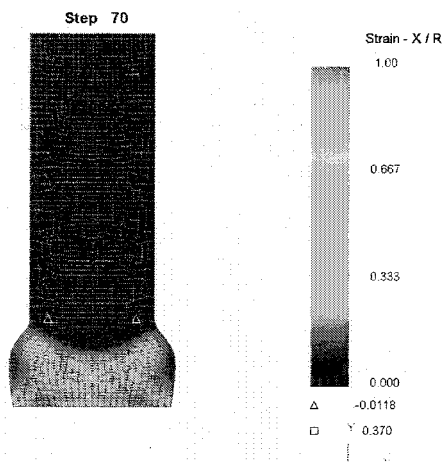
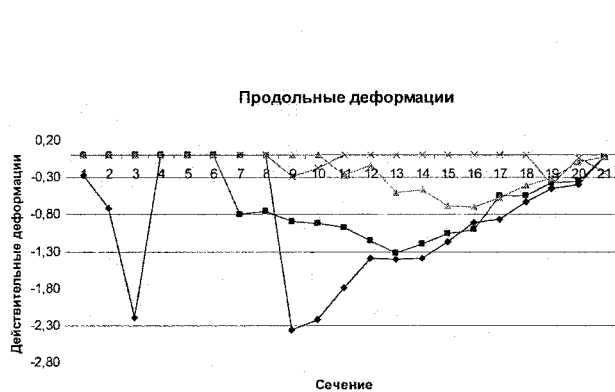
г) распределение продольных деформаций на стадии свободной осадки в пакете Deform



д) радиальные деформации на стадии закрытой осадки (экспериментальные)

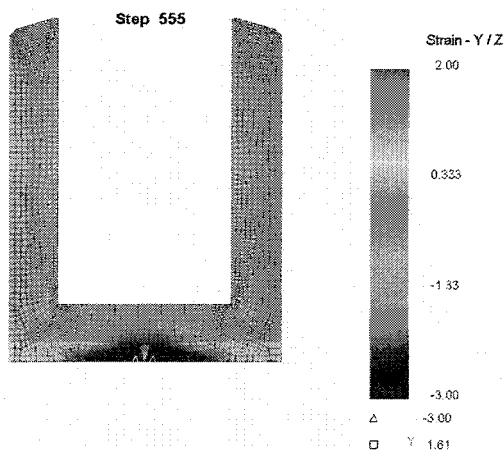
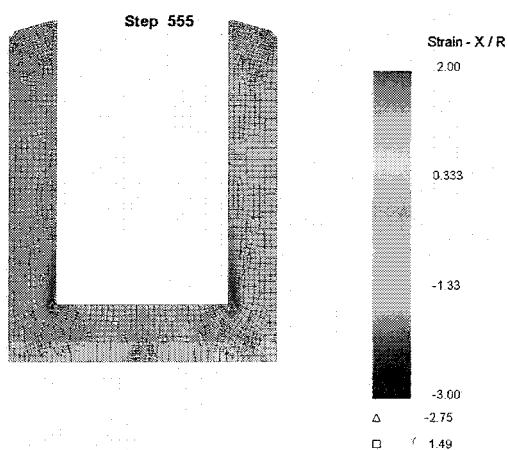


е) распределение радиальных деформаций на стадии закрытой осадки в пакете Deform



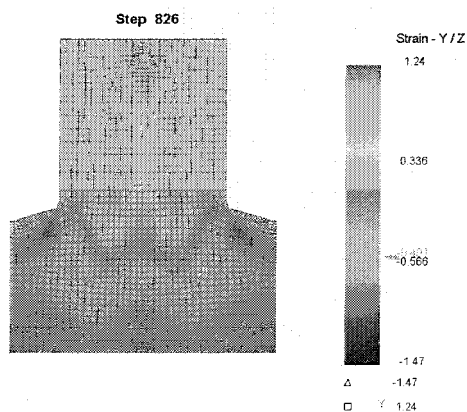
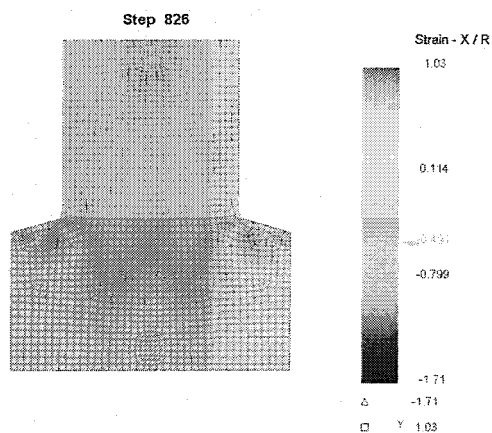
ж) Продольные деформации на стадии закрытой осадки (экспериментальные)

з) Распределение продольных деформаций на стадии свободной осадки в пакете Deform



и) Распределение радиальных деформаций на стадии закрытой прошивки в пакете Deform

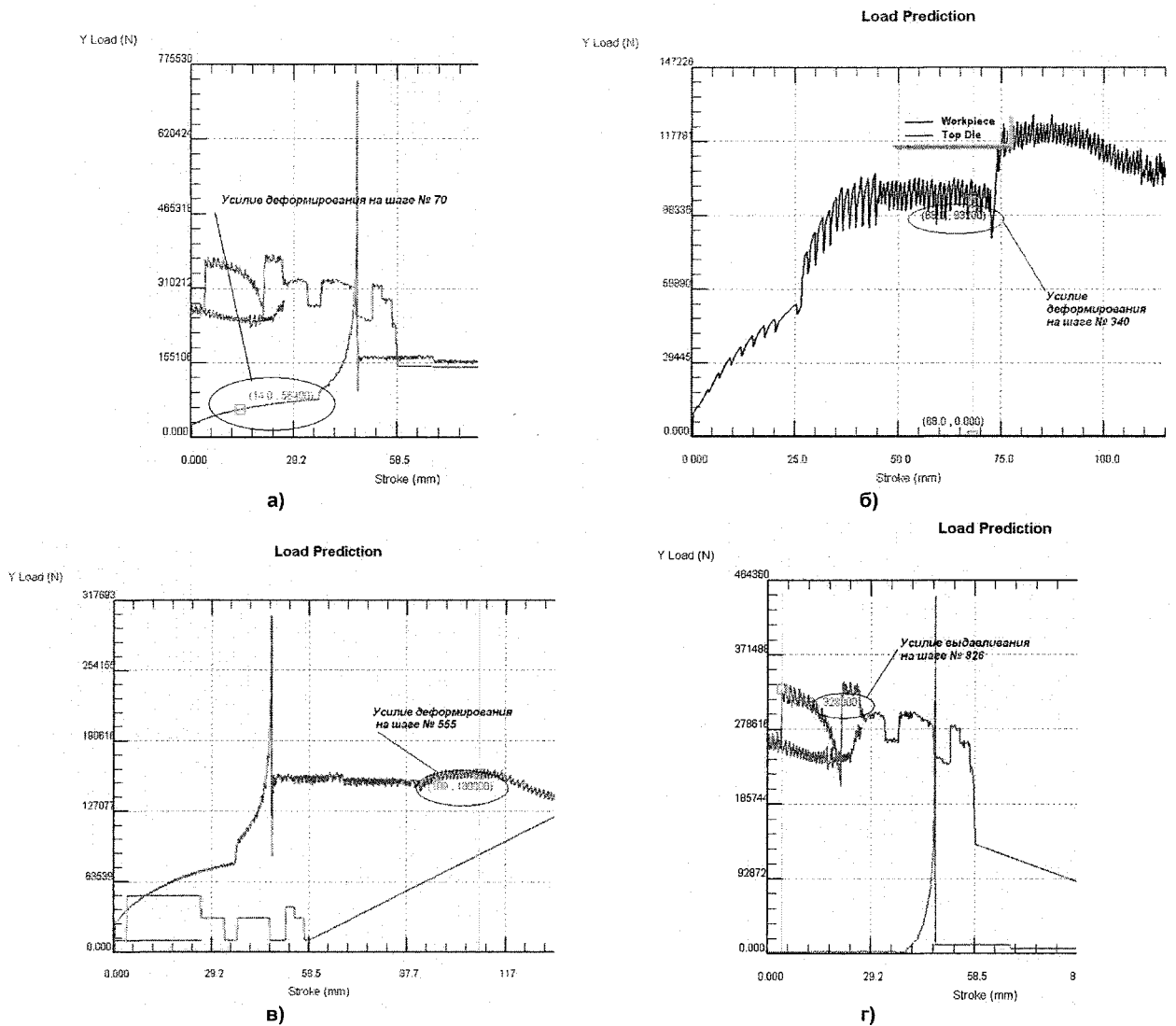
к) Распределение продольных деформаций на стадии закрытой прошивки в пакете Deform



л) Распределение радиальных деформаций на стадии обратного выдавливания в пакете Deform

м) Распределение продольных деформаций на стадии обратного выдавливания в пакете Deform

Рис. 3. Сравнение величин деформаций натурального и компьютерного экспериментов



**Рис. 4. Величина усилия деформирования в пакете Deform:**

**а – свободная осадка; б – закрытая осадка; в – закрытая прошивка; д – обратное выдавливание**

закрытой осадки, составляет порядка 100 кН. Оно складывается из усилия, необходимого для формоизменения заготовки, и усилия, необходимого для поднятия веса матрицы.

Анализируя полученные данные можно заключить, что в радиальном направлении в продольном сечении заготовки образовались области как растяжения, так и сжатия. Из графика (рис. 3, д) можно заключить, что центральная область ячейки  $x_1$  растягиваются по всем сечениям, наибольшее значение относительной деформации порядка 2 расположено в сечениях с 3 по 8. Область наибольшего растяжения расположена на расстоянии 6-7 мм от нижнего среза заготовки. Ячейки  $x_2$  до 6-го сечения расположены в угловой застойной зоне - зоне сжатия, где величина сжимающих деформаций достигает -1,76. В остальных сечениях ячейки  $x_2$  в радиальном направлении подвержены растяжению.

Величина максимальной деформации сжатия при моделировании рассматриваемого этапа в пакете Deform составляет -1,49 (рис. 3, е). Зона максимального сжатия находится в области примыкающей к стенке матрицы. Очаг наибольшего радиаль-

ного растяжения расположен на расстоянии 5-6 мм от нижнего среза в области оси симметрии заготовки. Величина деформации там составляет -1,59.

На основании проведенного эксперимента и анализа построенных графиков (рис. 3, ж) можно заключить, что наибольшие действительные продольные деформации сжатия возникают в районе оси симметрии заготовки на расстоянии нескольких сантиметров от нижнего торца заготовки, их величина достигает 2,35. В области  $x_4$  в сечениях 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 происходит вырождение крайней линии, ограничивающей эту область.

Аналогичную картину можно наблюдать при моделировании процесса в пакете Deform (рис. 3, з). В продольном сечении заготовки область максимального сжатия расположена вблизи нижнего торца заготовки и ярко выражена. Максимальное значение продольной действительной деформации составляет -1,8. Усилие деформирования, необходимое для осуществления процесса закрытой осадки, составляет 93,2 кН при перемещении пуансона на 68 мм (рис. 4, б).

Закрытая прошивка (рис. 2, в) осуществляется путем перемещения пуансона на 108 мм. Заготовка

## Сравнение компьютерного и натурального экспериментов

Свободная осадка								
Рад. деф.			Прод. деф.			Усилие, кН		
нат.	мод.	расхожд., %	нат.	мод.	расхожд., %	нат.	мод.	расхожд., %
0,44	0,37	15,0	-1,0	-0,74	26,0	60-70	56,4	6,0
Закрытая осадка								
Рад. деф.			Прод. деф.			Усилие, кН		
нат.	мод.	расхожд., %	нат.	мод.	расхожд., %	нат.	мод.	расхожд., %
-1,76	-1,59	9,0	-2,3	-1,8	21,0	100	93,2	6,8
Закрытая прошивка								
Рад. деф.			Прод. деф.			Усилие, кН		
нат.	мод.	расхожд., %	нат.	мод.	расхожд., %	нат.	мод.	расхожд., %
-	1,49	-	-2,75	150	160	6,25	-	1,49
Обратное выдавливание								
Рад. деф.			Прод. деф.			Усилие, кН		
нат.	мод.	расхожд., %	нат.	мод.	расхожд., %	нат.	мод.	расхожд., %
-	-1,71	-	-	300	328	8,5	-	-1,71

преобразуется в «стакан» с высотой дна 11 мм, общей высотой стакана 58 мм. На рассмотренном этапе подвижная матрица поднялась вверх на 74 мм. При осуществлении операции матрица выполняет еще и роль противодействия, необходимого для формирования ровной бездефектной поверхности заготовки и полного заполнения углов. При деформировании свинцовых заготовок веса матрицы оказалось достаточно для того, чтобы обеспечить заполнение углов и предотвратить образование дефектов. Величина усилия деформирования, необходимого для осуществления операции закрытой прошивки составила порядка 150 кН. На рассматриваемом этапе оказалась проблематичным измерить размер ячеек сетки, поэтому для оценки величины деформации в дальнейшем был использован пакет Deform. Шаг № 555 наиболее полно иллюстрирует параметры процесса закрытой прошивки. Усилие, замеренное в процессе моделирования, составило 160 кН (рис. 4, в).

Картина распределения радиальных деформаций представлена на рис. 3, и. В области под пуансоном заготовка растягивается, и максимальная величина действительных деформаций составляет 1,49 у основания заготовки. Во внутренних углах «стакана» образовалась область интенсивного радиального сжатия, действительные деформации достигают там величины -2,75.

В продольном направлении, как показывает рис. 3, к, область наибольшего сжатия расположена под пуансоном и примыкает к нижнему торцу заготовки, там величина максимальной действительной деформации сжатия составляет -3,00. Стенки «стакана» растягиваются с различной интенсивностью, поскольку скорости движения пуансона, сжимающего металл, и металла, поднимающего матрицу, неодинаковы. Поэтому у внутренней стенки стакана металл растягивается в продольном направлении, а у наружной стенки сжимается. Максимальная действительная деформация растяжения находится в угловой зоне и составляет 1,61.

Операция выдавливания проиллюстрирована на рис. 2, г. Для осуществления этого процесса воздействие на материал происходит при помощи подвижной матрицы. Она перемещается на 70 мм, максимально выдавливая металл в цилиндрическую полость под пуансоном, поднимая его. Пуансон не вынимается из матрицы, а выполняет роль

противодавления, образованного за счет его собственного веса и величины гидростатического давления, действующего на его боковые поверхности со стороны заготовки. Величина усилия выдавливания составила порядка 300 кН.

Рассматриваемая стадия обратного выдавливания соответствует 826 шагу моделирования в пакете Deform. Моделируя процесс в пакете Deform величина усилия составила 328 кН (рис. 4, г).

На рис. 3, л, м представлены величины радиальной и осевой деформаций на рассматриваемом шаге. Интенсивность деформаций на данном этапе при распределении по продольному сечению составляет от 2 до 8.

### Выводы

В ходе проведения натурального эксперимента были полученные качественные образцы с измененной макро- и микроструктурой, было оценено и описано качество деформируемых образцов на каждом переходе цикла исследуемого процесса, определено потребное усилие деформирования и степени деформаций в радиальном и продольном направлениях (таблица).

Проведенное исследование показало хорошую сходимость результатов компьютерного моделирования в пакете Deform 2D и натурального эксперимента. На каждом переходе величины усилий, полученных путем компьютерного моделирования, отличается от натуральных на 6-8 % (см. таблицу). Значение степеней деформации, полученные при компьютерном и натуральном экспериментах несколько отличаются (9-26 %, см. таблицу). Но несмотря на это можно сделать заключение о целесообразности использования программы Deform для изучения способа пластического структурообразования металлов.

### Литература

1. Сторожен, М.В. Теория обработки металлов давлением /М.В. Сторожев, Е.А. Попов. — М.: Машиностроение, 1971. - 424 с.
2. Дмитриев, А.М. Технологияковки и объемной штамповки. Объемная штамповка выдавливанием: учеб. для вузов по специальности «Машины и технология обработки материалов давлением» /А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов. — М.: Высш. шк., 2002. - 400 с.

Поступила в редакцию 13 сентября 2010 г.