

УДК 621.983

Калюжный В.Л., Калюжный А.В., Пиманов В.В., Лавриненков А.Д.

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт".  
Украина, Киев

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ С УТОНЕНИЕМ СТУПЕНЧАТЫМ ПУАНСОНОМ ЗАГОТОВОК ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

##### Анотація

Методом скінчених елементів проведено моделювання витягування з потоншенням ступінчастим пуансоном порожнистих заготовок з високовуглецевої сталі. Визначені кінцева геометрія виробу, зусилля деформування, робота деформації, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті та напружено-деформований стан zdeформованого металу. Отримані дані для прогнозування механічних властивостей в стінці виробу. Розрахунковим шляхом визначені всі параметри для проектування технології витягування з потоншенням. Спроектований штамп для реалізації витягування на практиці.

##### Abstract

The method of finite elements is conduct the design of drawing with thinness of hollow blank a step punch from high-carbon steel. Certain eventual geometries of good, effort of deformation, work of deformation, distributing of specific efforts on a deforming instrument and tensely-deformed state of deformed metal. Information is got for prognostication of mechanical properties in the wall of

produce. By a calculation a way all parameters are certain for planning of technology of drawing with thinness. A stamp is projected for realization of drawing in practice.

В настоящее время для проектирования процессов холодной вытяжки и вытяжки с утонением широко используют универсальные коммерческие и авторские программы на базе различных подходов метода конечных элементов (МКЭ) для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки при формоизменении. Приведем некоторые примеры. С использованием комплекса ANSYS 5.3 создана методика численного расчета процессов вытяжки тонколистового материала [1]. Изучено влияние коэффициента трения на НДС. Расчетные деформации совпали с экспериментом. В работе [2] приводятся сведения о разработке КЭ программы Optris фирмой Dynamic Software для моделирования процессов вытяжки. Расчеты по программе гарантируют реализацию вытяжки на практике. Предложен усовершенствованный МКЭ для упруго-пластического формоизменения со смазкой [3]. Проверка метода осуществлена на



утолнении при изготовлении банок из алюминия. Приведена методика моделирования вытяжки на базе определения упруго-пластического НДС при поэтапном деформировании с учетом упрочнения, анизотропии приведена в [4]. Математические исследования вытяжки с использованием КЭ программы DYNA-3D выполнены в [5]. Полученные результаты по глубине вытяжки не всегда совпадали с экспериментом. Анализ процессов глубокой вытяжки с использованием КЭ программы ABAQUS выполнен в работе [6]. Расчетные данные по усилиям, НДС проверялись на опытно-производственной линии. Таким образом, использование коммерческих программ не всегда обеспечивает нужный результат, необходимы знания пользователями в программировании и области обработки металлов давлением. Поэтому необходимы специализированные КЭ программы для моделирования холодного пластического формоизменения металла. Такой пакет программ на основе упругопластического анализа НДС способом начальных напряжений был разработан авторами. Результаты расчетов проверялись многочисленными экспериментами по силовым режимам, удельным усилиям, НДС, что позволило осуществить усовершенствование пакета и получать данные для проектирования технологий без доработки трудоемкими, дорогостоящими производственными испытаниями.

Цель работы — путем моделирования определить параметры вытяжки с утонением ступенчатым пуансоном заготовок заданных размеров из высокоуглеродистой стали.

На рис. 1 приведена схема вытяжки в исходном состоянии. Заготовка 1, полученная холодным обратным выдавливанием, устанавливается на коническую поверхность матрицы 2. Вытяжка осуществляется ступенчатым пуансоном 3. Расчетная схема для моделирования показана на рис. 2. Из-за осевой симметрии рассматривали половину заготовки. Заготовка 1 была разделена на восемь узловых изопараметрические конечные элементы. Поверхности матрицы 2 и пуансона 3 считались абсолютно жесткими. В исходном состоянии пуансон 3 упирался в плоско-конусную доннюю часть заготовки. Процесс вытяжки распределялся на некоторое количество шагов нагружения заготовки пуансоном для определения возможности отрыва дна и разрушения металла при формоизменении. Моделирование заканчивали при получении конечной геометрии изделия. Учтено упрочнение металла, трение на контактных поверхностях, а также разгрузку после пластической деформации. Свойства заготовки из высокоуглеродистой стали в исходном состоянии: модуль Юнга  $2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона 0,3, условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 375$  МПа.

Диаграмму истинных напряжений аппроксимировали степенной зависимостью, диаграмму пластичности — формулой Г.Д. Деля, степень использования ресурса пластичности определяли по критерию В.А. Огородникова.

На рис. 3 показаны этапы формообразования изделия при моделировании. Сначала, за счет деформирования стенки по конусу матрицы, происходит только обжатие заготовкой (а) цилиндрической поверхности пуансона. В дальнейшем начинается обжатие с одновременной вытяжкой с утонением по первой конической ступени (б) и цилиндрической поверхности большего диаметра пуансона (в). Завершается процесс формированием утоненной конической поверхности стенки второй ступенью пуансона (г).

Зависимость усилия вытяжки на пуансоне от его перемещения приведена на рис. 4. Изменение усилия происходит в соответствии с этапами формообразования изделия. Обжатие цилиндрической стенки осуществляется при усилении 120 кН. Максимальное усилие (148 кН) имеет место при вытяжке с утонением на цилиндрической поверхности большего диаметра пуансона. На конечной стадии вытяжки усилие снижается, так как объем металла деформируется по всей конической поверхности матрицы. По наведенной зависимости определяется работа деформации.

При вытяжке с утонением сталей с высоким сопротивлением деформированию матрица воспринимает распирающие удельные усилия, поэтому ее выполняют бандажированной. Для определения количества бандажей необходимо иметь точное распределение распирающих удельных

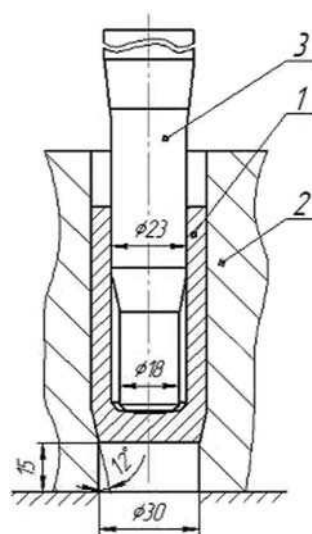


Рис. 1. Схема процесса вытяжки с утонением

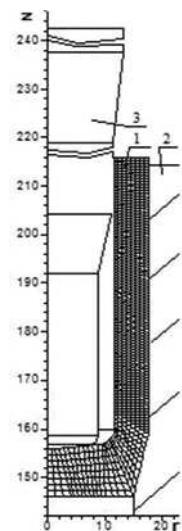
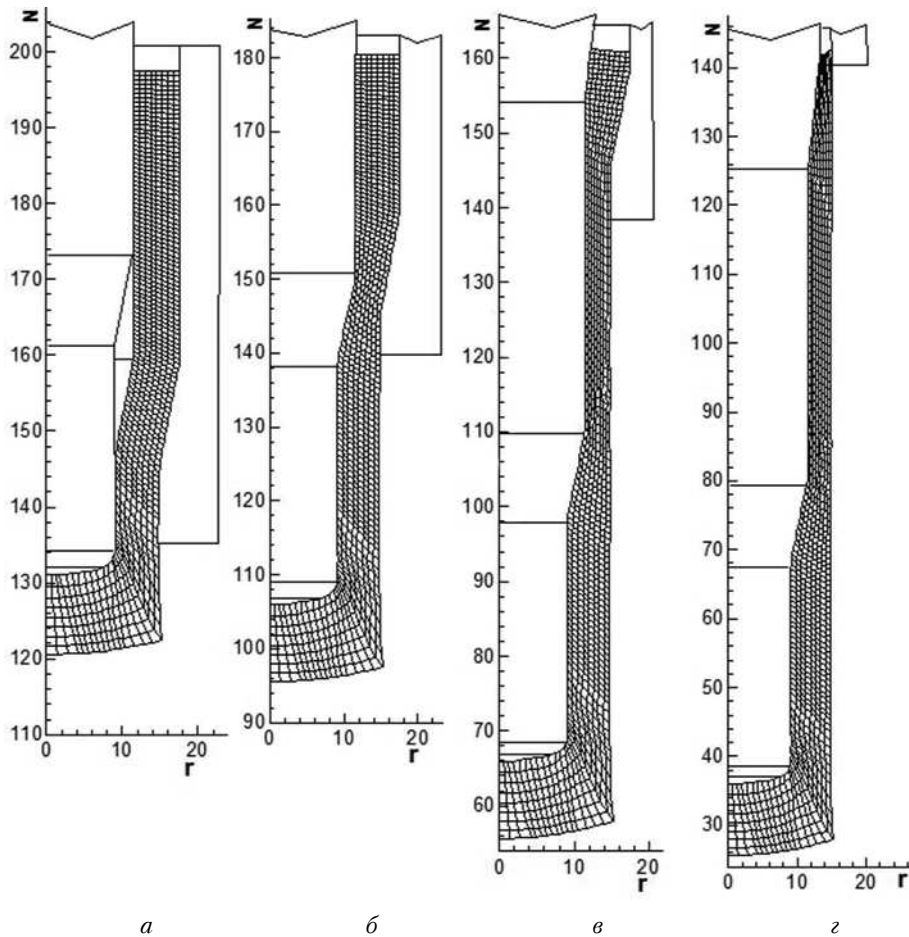


Рис. 2. Расчетная схема (размеры в миллиметрах)



**Рис. 3.** Этапы формообразования изделия с внутренней стенкой сложной конфигурации при вытягивании с утончением ступенчатым пуансоном (размеры в миллиметрах):

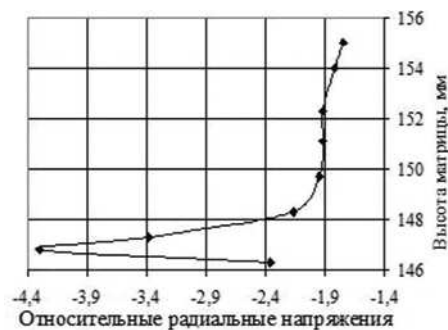
*a* – перемещение пуансона 25 мм; *б* – перемещение пуансона 50 мм; *в* – перемещение пуансона 90 мм; *г* – перемещение пуансона 120 мм

усилий по высоте конической поверхности матрицы. В рассматриваемом случае распределение указанных усилий определили при максимальном усилии вытяжки. На рис. 5 показано распределение относительных радиальных напряжений  $\sigma_r/\sigma_{0,2}$  по высоте конической поверхности матрицы. Максимальное значение по абсолютной



**Рис. 4.** Зависимость усилия вытяжки от перемещения пуансона

Они достигают максимальных значений (до 0,7) в верхней части стенки изделия. Тангенциальные деформации по объему все сжимающие. В верхней части стенки изделия степень использования ресурса пластичности достигает значения 0,8. В цилиндрической части большего диаметра стенки-



**Рис. 5.** Распределение относительных радиальных напряжений на матрице

величине  $\sigma_r/\sigma_{0,2} = 4,3$ , что составляет с учетом величины  $\sigma_{0,2} = 1612$  МПа.

На рис. 6, 7 и 8 показано соответственно распределение относительных радиальных  $\sigma_r/\sigma_{0,2}$ , осевых  $\sigma_z/\sigma_{0,2}$  напряжений и распределение относительной интенсивности напряжений  $\sigma_i/\sigma_{0,2}$  по объему сформированной заготовки. Относительные напряжения  $\sigma_r/\sigma_{0,2}$  по объему сжимающие. Наибольшие растягивающие  $\sigma_z/\sigma_{0,2}$  возникают в верхней части стенки заготовки. По распределению  $\sigma_i/\sigma_{0,2}$  можно оценить упрочнение металла по объему заготовки. Так в верхней конической части стенки металл упрочняется в 1,4 раза по сравнению с исходным состоянием. Распределение осевых  $\varepsilon_z$ , тангенциальных  $\varepsilon_t$  деформаций и степени использования ресурса пластичности  $\psi$  в сформированной заготовке показано на рис. 9–11. Осевые деформации по объему заготовки растягивающие.

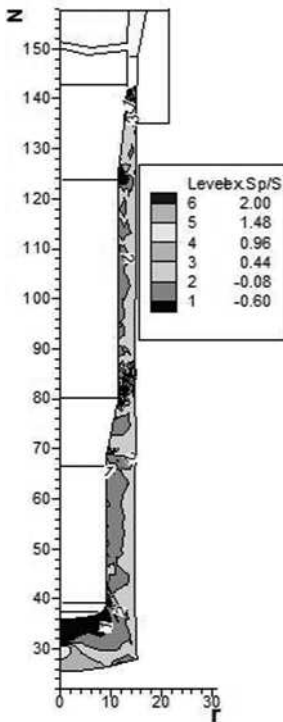


Рис. 6. Распределение относительных радиальных напряжений  $\sigma_r/\sigma_{0,2}$  (размеры в миллиметрах)

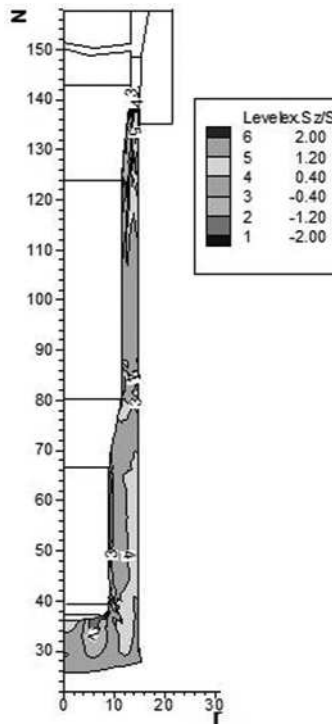


Рис. 7. Распределение относительных осевых напряжений  $\sigma_z/\sigma_{0,2}$  (размеры в миллиметрах)

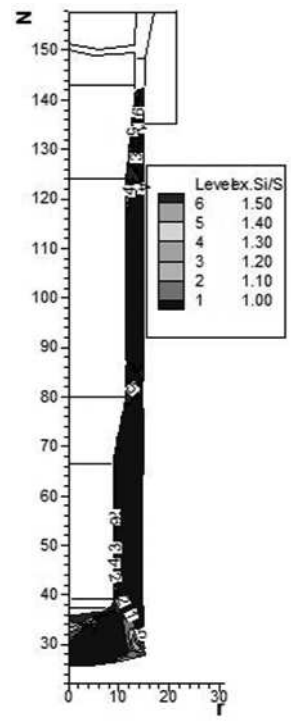


Рис. 8. Распределение относительной интенсивности напряжений  $\sigma_t/\sigma_{0,2}$  (размеры в миллиметрах)

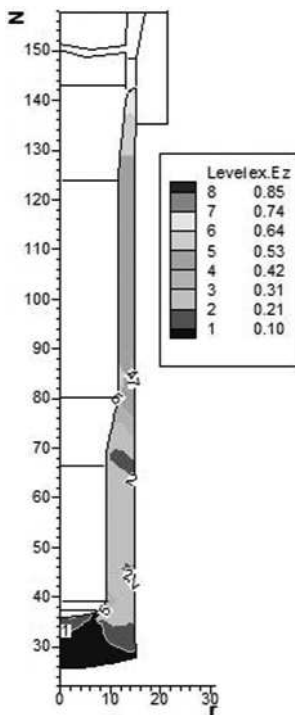


Рис. 9. Распределение осевых деформаций  $\epsilon_z$  (размеры в миллиметрах)

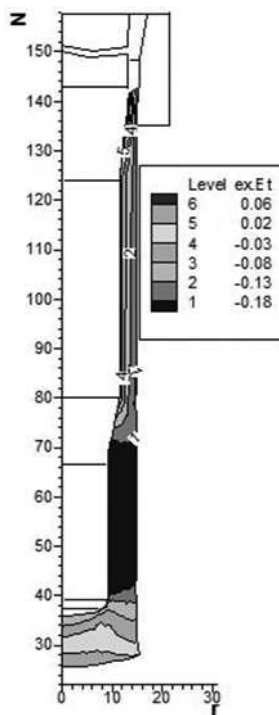


Рис. 10. Распределение тангенциальных деформаций  $\epsilon_t$  (размеры в миллиметрах)

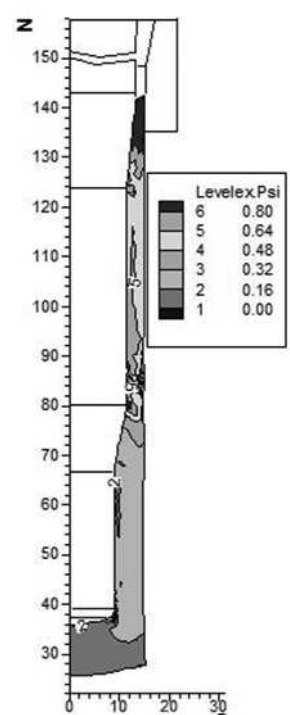


Рис. 11. Распределение степени использования ресурса пластичности  $\psi$  (размеры в миллиметрах)

0,6, меньшего диаметра 0,2. По распределению  $\psi$  можно прогнозировать показатели пластичности в стенке после холодной пластической деформации.

Таким образом, путем моделирования определены все необходимые данные для разработки технологии: конечная необходимая геометрия изделия; усилие деформирования и работа деформации — для выбора оборудования; распределение относительных нормальных напряжений на деформирующем инструменте — для проектирования штамповой оснастки; распределение НДС и степени использования ресурса пластичности — для прогнозирования механических свойств по объему изделия.

На рис. 12 приведена схема конструкции однопозиционного штампа для вытяжки с

утонением ступенчатым пуансоном. Принцип работы штампа заключается в следующем. Заготовка устанавливается и центрируется в матрице 4 по предварительно сформированной конической поверхности. Вытяжка осуществляется пуансоном 3. Снятие изделия с пуансона происходит при обратном ходе ползуна прессы подпружиненными съемниками 11.

### Выводы

1. Моделированием МКЭ установлена возможность вытяжки с утонением ступенчатым пуансоном заготовок из высокоуглеродистой стали.

2. Определена конечная геометрия изделия, силовые режимы, удельные усилия, распределение НДС в сформированном металле для прогнозирования механических свойств в стенке изделия.

3. Спроектирован штамп для реализации вытяжки с утонением ступенчатым пуансоном.

### Литература

1. Будилов И.Н., Шолом В.Ю., Жернаков В.С. Моделирование вытяжки тонколистового металла // Кузнечно-штамп. пр-во, 1999. — № 5. — С. 40–43.

2. Virtuales Tiefziehen // Blech Rohre Profile. — 2000. — 47, №1–2. — С. 36–37.

3. Cahouet V., Beillett L., Meurisse M. Direct and indirect approaches at the plasto-hydrodynamic lubrication problem. Application to an industrial ironing process // Trans. ASME. J. Tribol. — 1999. — 121, №3. — С. 523–528.

4. Жарков В.А. Математическое моделирование вытяжки сложных деталей // Кузн. штамп. про-во, 2000. — № 7. — С. 30–35.

5. Gotoh M., Kim Y., Yamshita M. A numerical investigation of cap forming by the stretch-drawing process-single and double operations // JSME Int. J. C. — 2000. — 43, № 3. — С. 586–593.

6. Nam J., Han K. Finite-element analysis of deep drawing and ironing process in the steel // JSIJ. Int. — 2000. — 40, №12. — С. 1223–1229.

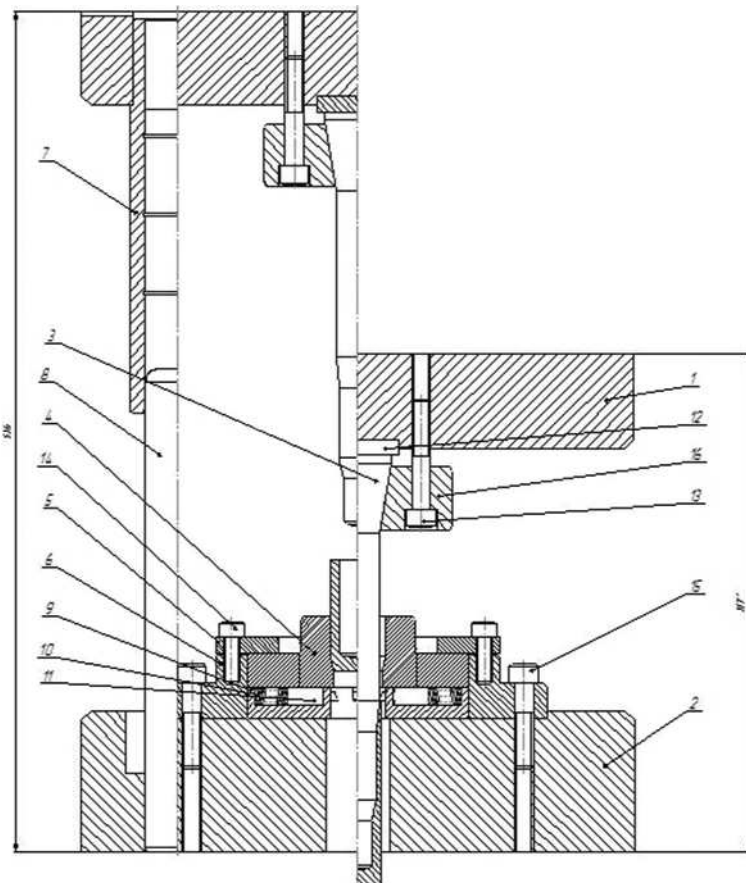


Рис. 12. Штамп для вытяжки с утонением.

1 — верхняя плита, 2 — нижняя плита, 3 — пуансон, 4 — бандажированная матрица, 5 — прижимное кольцо, 6 — матрицедержатель, 7 — втулка направляющая, 8 — колонка, 9 — опорная плита, 10 — пружина, 11 — съемник, 12 — подкладная плита, 13, 14, 15 — винты, 16 — пуансонодержатель