

УДК 621.983

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РАСЧЕТАХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИЛЬЗ ДЛЯ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ И СТРЕЛКОВЫХ БОЕПРИПАСОВ

А. В. КАЛЮЖНЫЙ, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

В НТУУ «КПИ» разработан специализированный пакет программ на базе метода конечных элементов, который дополнен рядом теоретических и программных модулей, что позволило расширить область применения пакета на операции листовой штамповки. Полученный программный продукт с высокой степенью точности позволяет проводить расчеты процессов листовой штамповки. Приведены примеры расчетов технологических процессов получения пустотелых изделий специального назначения (гильз для артиллерийских и стрелковых боеприпасов).

В НТУУ «КПИ» розроблено спеціалізований пакет прикладних програм на базі методу скінчених елементів, який доповнено низкою теоретичних і програмних модулів, що дозволило розширити застосування пакета на операції листового штампування. Отриманий програмний продукт з високим ступенем точності дозволяє проводити розрахунки процесів листового штампування. Наведено приклади розрахунків технологічних процесів отримання порожнистих виробів спеціального призначення (гільз для артилерійських та стрілецьких боеприпасів).

In NTUU «KPI» a specialized package of programs was developed on basis of the method of finite elements which is supplemented by a number of theoretical and program modules. This allowed including into the field of application of the package operations of the sheet-metal stamping. The developed software product allows performing high accuracy calculations of the sheet-metal stamping processes. Examples of calculation of technological processes of producing special-purpose hollow items (cases for artillery and rifle ammunition) are presented.

В современных условиях перед разработчиками новейших технологий в области листовой штамповки возникают две важные задачи. С одной стороны, в условиях конкуренции разработка технологии и сам технологический процесс должны состоять из минимального количества переходов, что обусловлено показателями экономии материальных, трудовых и временных ресурсов. С другой стороны, современные требования к материалам и качеству новых изделий не позволяют использовать традиционные подходы к проектированию технологических процессов, базирующихся на производственном опыте и экспериментальной отработке. Для решения поставленных задач все чаще используют математическое моделирование, которое реализовано в ряде универсальных коммерческих пакетов (ANSYS, LS-DYNA, FastForm, Dyna-

Form, NASTRAN, COSMOS, ABAQUS и прочие). Однако вопреки всем преимуществам данные программы имеют один существенный недостаток: для работы с ними необходимы высококвалифицированные специалисты как в программировании (подготовка исходных данных для расчетов), так и в области обработки металлов давлением (анализ результатов моделирования и обоснование их использования на производстве).

Поэтому для учета преимуществ и компенсации недостатков на кафедре механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов НТУУ «КПИ» проводили работы по созданию собственного пакета программ, для решения на базе метода конечных элементов (МКЭ) конкретных задач листовой штамповки.

Цель и постановка задачи исследований. Выбор рационального технологического процесса требует тщательного анализа большого

© А. В. КАЛЮЖНЫЙ, 2009

количества параметров, которые определяют качество деталей и затраты на их изготовление. Для анализа одних из них достаточно сведений о физико-механических свойствах материалов и технологического опыта, для анализа других приходится применять разные методы моделирования. В первую очередь это касается сложных по форме деталей, которые изготавливаются из металлических материалов с ограниченной пластичностью методами обработки давлением. Возможности моделирования процесса формообразования таких деталей значительно расширились с применением современных компьютерных методов, в частности математического моделирования, имеющих место при штамповке с большими пластическими деформациями, выполняемого на базе конечных или граничных элементов.

Рассмотрим параметры, влияющие на процессы листовой штамповки и постараемся оценить качество полученных изделий (рис. 1). Наиболее важные параметры делятся на конструктивные (Π_k), технологические (Π_t) и физико-механические (Π_{f-m}). При вытяжке они определяют схему напряженно-деформи-

рованного состояния в металле. В свою очередь, схема напряженно-деформированного состояния влияет на усилие деформирования P_d , удельные усилия p на деформирующем инструменте, а также технологическую пластичность металла (пластичность металла во время той или иной операции вытяжки). Далее по усилию, необходимому для деформирования, выбирают оборудование, по удельным усилиям оценивают стойкость инструмента. Технологическая пластичность металла является определяющей для получения геометрии изделия, упрочнения подвергнутого деформации металла и степени использования ресурса пластичности. Последние три фактора, на наш взгляд, характеризуют качество изделий после вытяжки. Такой подход дает возможность определять влияние Π_k , Π_t и Π_{f-m} параметров на усилие деформирования $P_d = f(\Pi_k, \Pi_t, \Pi_{f-m})$, удельные усилия $p = f(\Pi_k, \Pi_t, \Pi_{f-m})$ и показатель для оценки качества изделий $Q = f(\Pi_k, \Pi_t, \Pi_{f-m})$. Существующие решения процессов вытяжки с использованием теоретических методов, а также выполненное моделирование на базе МКЭ



Рис. 1. Параметры процессов вытяжки

не учитывают комплексное влияние параметров P_k , P_t и P_{f-m} на силовые режимы, характер формоизменения металла в процессе вытяжки и особенно на качество изделий.

Таким образом, моделирование процесса вытяжки полых изделий со сложным профилем дна с учетом комплексного влияния параметров P_k , P_t и P_{f-m} может быть основой для разработки ресурсосберегающих технологий изготовления изделий необходимой формы с прогнозируемыми свойствами деформированного (подвергнувшегося деформации) металла, а также изделий с заданным качеством.

Анализ конструктивных, технологических и физико-механических параметров детали показал, что наиболее перспективным процессом получения детали может быть вытяжка из предварительно спрофилированной заготовки с последующей механической обработкой. Существующие решения процесса вытяжки с использованием теоретических методов не позволяют одновременно оценить влияние указанных параметров P_k , P_t и P_{f-m} на характер формоизменения металла в процессе вытяжки, которое и является причиной тех результатов, как было отмечено выше. Следует отметить, что в литературных источниках приведены решения задачи вытяжки с использованием МКЭ. Однако и в этих решениях отсутствует комплексная оценка влияния P_k , P_t и P_{f-m} на силовые режимы и качество изделий. Кроме того, получаемые результаты решения достаточно противоречивы. Сложность моделирования процессов вытяжки заключается еще и в том, что необходимо учитывать поворот конечных элементов периферийной части заготовки, а поскольку моделирование процессов профилирования заготовок холодным выдавливанием и вытяжку необходимо начинать с исходного положения заготовки, то, кроме учета параметров в виде кинематических и статических предельных условий и соответствующих зависимостей, необходимо выполнять переопределение предельных условий после каждого шага нагружения.

С учетом приведенного выше возникла необходимость усовершенствования пакета прикладных программ, которая позволит 1) создавать математические модели процессов вытяжки, описывающие характер формоизменения металла, максимально приближенный к действительности; 2) определять напряженно-деформированное состояние во всем объеме деформируемого металла — от исходного положения заготовки к переходу процесса деформирования в установившуюся стадию или к получению необходимой геометрии изделия; 3) оценить влияние конструктивных, технологических и физико-механических параметров на усилие деформирования и удельные усилия на контактных поверхностях и определять их оптимальные значения с точки зрения минимальных усилий и запаса прочности деформирующего инструмента при получении изделий необходимой формы, а также рациональные значения — для получения изделий заданного качества.

Из современных численных методов определения упругопластического состояния деформируемого металла наиболее широко используют МКЭ, который имеет три подхода для решения таких задач: переменных параметров упругости, способ начальных напряжений и способ начальных деформаций. Нами выбран способ начальных напряжений потому, что [1]:

1) решение задачи упругопластического деформирования справедливо для любой зависимости между напряжениями и деформациями (по диаграмме истинных напряжений), а также для идеально пластического материала. Последнее дает возможность сравнить решение по усовершенствованной теории с экспериментальными данными по деформированному состоянию заготовок из свинца;

2) способ учитывает разгрузку металла, поэтому есть возможность определить упругую деформацию в процессе вытяжки.

В основу построения математической модели положен вариационный принцип, согласно которому среди возможных кинематических решений, точное решение отвечает минимуму функционала [2]

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{\sigma\}^T \{\varepsilon\} dV - \int_{S_t} \{q\}^T \{\delta\} ds,$$

где S_t — поверхность, на которую действует распределенная нагрузка (инструмент).

Для деформируемого металла, разделенного на конечные элементы:

$$\Pi = \frac{1}{2} \{\delta\}^T \{\delta\} \sum_{\text{по элем.}} \int_V [B]^T [D^e] [B] dV - \sum_{\text{по пов. } S_t} \{F\}^T \{\delta\}.$$

Минимизация по перемещениям дает

$$\{\delta\}^T \sum_{\text{по элем.}} [k^e] - \sum_{\text{по пов. } S_t} \{F\} = 0,$$

$$\text{где } [k^e] = \int_V [B]^T [B] [D] dV.$$

В общем виде $[K] \{\delta\} = \{F\}$.

Для процессов деформирования, распределенных на определенное количество шагов нагружения, запишем последнее выражение в простоте $[K] \{\Delta\delta\} = \{\Delta F\}$.

Расчетные значения напряжений для каждого шага нагрузки должны удовлетворять условию равновесия $\int_V [B]^T [\Delta\sigma] dV = \{\Delta F\}$.

Такой подход позволяет успешно проводить расчетный анализ процесса вытяжки на неустановившейся стадии, когда перемещения и деформации малы.

Для расчета больших деформаций используем следующее выражение [3]:

$$\int_V^{t+\Delta t} S_{ij}^{t+\Delta t} E_{ij} dV = \int_S^{t+\Delta t} q^{t+\Delta t} \delta_i ds,$$

где S_{ij} — компоненты 2-го тензора Пиоли-Кирхгофа; E_{ij} — компоненты тензора деформаций Грина-Лагранжа.

В формулировке МКЭ имеем $[K_n] \{\Delta\delta\} = \{\Delta F\}$.

Учет конструктивных и технологических параметров при математическом моделировании проводили следующим образом. Конструктивные параметры учитывали путем задания граничных условий в виде наличия или отсутствия перемещений в направлениях осей координат с возможностью переопределения их в процессе расчета.

Технологические параметры учитывали с помощью задачи условий сопряжения и взаимодействия заготовки и инструмента. В частности, тип смазки на контактной поверхности при моделировании учитывали в виде величины коэффициента трения для определения касательных напряжений на контактирующих поверхностях — цилиндрических поверхностях $\tau_k = \mu\sigma_p$ и конических $\tau_k = \sigma_2 \sin \alpha + \sigma_p \cos \alpha$. Действие дополнительного противодавления на свободную поверхность заготовки моделировали наложением поверхностной распределенной нагрузки. Принудительное смещение инструмента можно учесть наложением поверхностной нагрузки к поверхностям τ_k в направлении течения металла.

Анализ процессов деформирования из исходного положения заготовки и распределение их на определенное количество шагов нагружения позволяет определять наличие неустановившегося течения и локальный характер очага деформации.

Физико-механические свойства задавали следующим образом: упругие свойства металла (модуль Юнга и коэффициент Пуассона), диаграмму истинных напряжений аппроксимировали зависимостью: $\sigma_s = \sigma_{0,2} + k\varepsilon^n$, а диаграмму разрушения выражением [3]: $\lambda_p = \frac{\lambda_p(\eta = -1) \lambda_p(\eta = 0) \exp(-\eta)}{\lambda_p(\eta = -1) + \eta[\lambda_p(\eta = -1) - e\lambda_p(\eta = 0)]}$. Для определения степени использования ресурса пластичности учитывали влияние третьего инварианта тензора напряжений на пластичность $\eta' = \sqrt{I_3(T_\sigma)} / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$ $f(\eta) = \eta' / (\Delta\eta - \eta)$ [3]. По значениям $f(\eta)$, η' находим дополнительное значение $\Delta\eta$.

Качество изделий Q , подвергаемых к процессу вытяжки, оценивали по коэффициенту упрочнения металла $k = \sigma_s / \sigma_{0,2}$ подвергнутого деформации; степени использования ресурса пластичности ψ ; геометрии изделия и упругой деформации. Такой подход дает возможность определять влияние Π_k , Π_t и Π_{f-m} параметров на усилие деформирования $P_d = f(\Pi_k, \Pi_t, \Pi_{f-m})$, удельные усилия и показатель для оценки качества изделий $Q = f(\Pi_k, \Pi_t, \Pi_{f-m})$.

Кроме того, во время усовершенствования математической модели и пакета прикладных программ были решены такие важные задачи, как:

а) учет **технологической наследственности**, включая возможность разрушения, что является одним из определяющих факторов при расчетах процессов листовой штамповки, состоящих из двух и более переходов;

б) определение и компенсация **утонения в опасном сечении** — на радиусах закругления деформирующего инструмента. Это утонение имеет существенное влияние на геометрию изделий и технологические свойства заготовки при дальнейшем формообразовании.

Результаты исследований. Приведем примеры применения разработанного пакета программ для определения параметров процессов холодной листовой штамповки на основе математического моделирования МКЭ.

Расчетный анализ процессов предварительного профилирования заготовок для вытяжки и вытяжка из них полых изделий из стали. В связи с потребностью получения принципиально новых гильз со сложным профилем стенок и дна из сталей возникла проблема разработки ресурсосберегающих технологий их изготовления, в частности, деталей специального назначения из стали 11ЮА [4].

Традиционные технологические процессы изготовления таких изделий состоят из большого количества переходов получения элементов профиля, которые на сегодня экономически нецелесообразны.

Для достижения цели на кафедре механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов профессором В. И. Стеблюком с сотрудниками предложена следующая последовательность изготовления указанных деталей (рис. 2): формирование донной части изделия на стадии предварительного профилирования заготовки холодным выдавливанием с дальнейшими переходами вытяжки [5]. Это позволило сократить количество переходов межоперационной обработки, а также вдвое количество задействованного оборудования. Проведено моделирование двух переходов профилирования осесимметричной заготовки холодным выдавливанием и переходов дальнейшей комбинированной вытяжки полого изделия. Свойства исходного материала соответствовали: модуль Юнга $2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона — 0,3, условная граница текучести $\sigma_{0,2} = 120$ МПа. Размеры сформованных заготовок после двух переходов профилирования и операции вытяжки приведены на рис. 3. Причем при моделировании была учтена технологическая наследст-

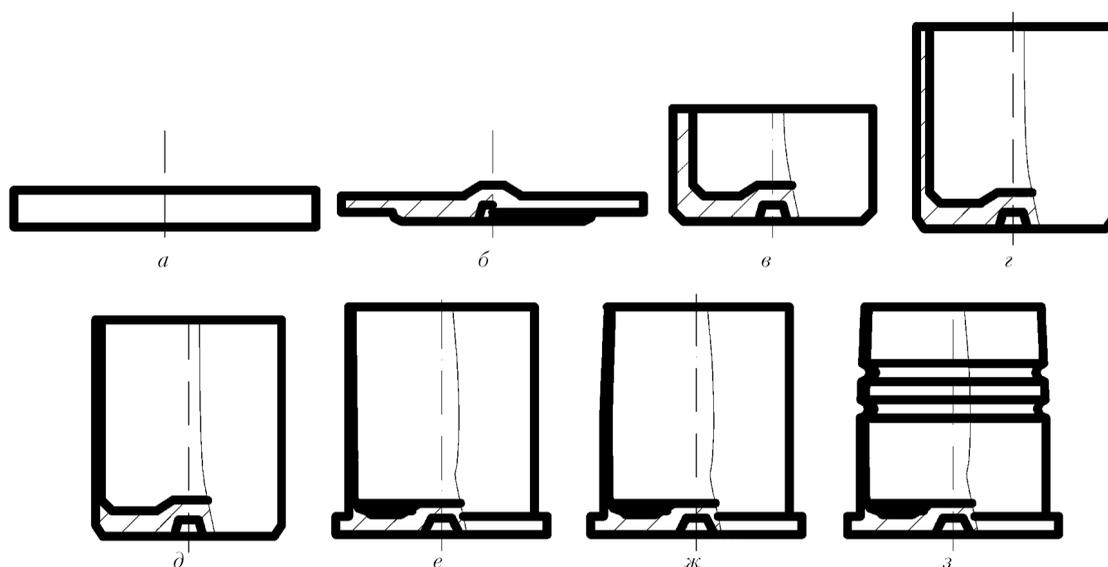


Рис. 2. Последовательность формообразования гильзы из предварительно спрофилированной заготовки: а — заготовка; б — холодное профилирование; в — вытяжка; г, д — комбинированная вытяжка; е — формирование дна; ж — обжатие; з — накатка рифтов

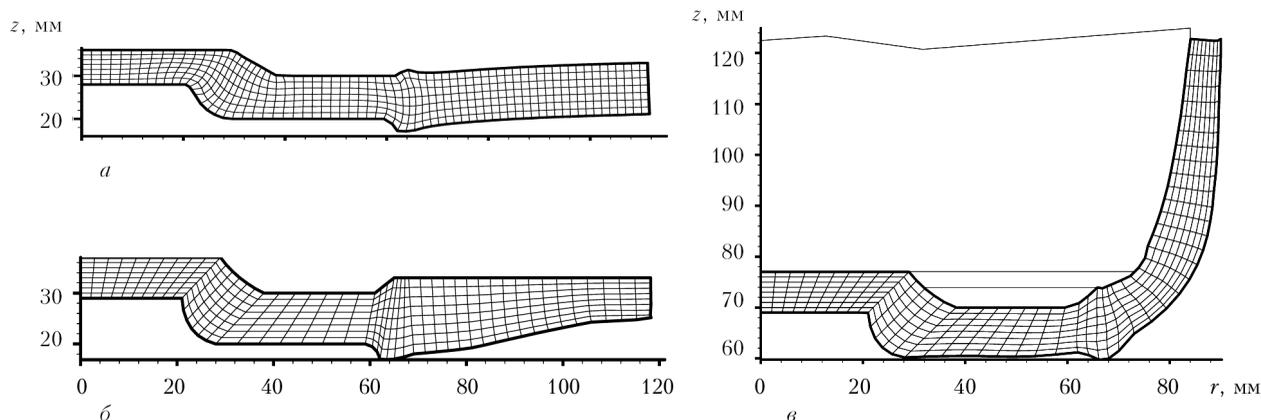


Рис. 3. Формоизменение заготовки после первого (а), второго (б) переходов профилирования и операции вытяжки (в)

венность после каждого перехода. Это дает возможность использовать результаты предыдущего перехода деформирования (формообразования) в качестве исходных данных для расчета следующего перехода, что значительно повышает качество расчета.

Силовые режимы формообразования, установленные расчетом, имеют следующие значения: первый переход профилирования — 12,5, второй — 8,5, вытяжка — 3,5 МН. Определено распределение напряженно-деформированного состояния и степени использования ресурса пластичности по всему объему сформованной заготовки после первого перехода профилирования, что позволяет выпол-

нить второй переход профилирования заготовки без дополнительной промежуточной операции отжига.

Моделирование процессов вытяжки полых изделий специального назначения из титанового сплава. Путем моделирования решена задача вытяжки полых изделий как из обычной заготовки, так и предварительно спрофилированной, в частности из титанового сплава. Такая задача возникла в связи с практически отсутствующими решениями по обработке давлением (особенно вытяжке) титановых сплавов. Рассмотрим расчет процесса вытяжки изделия из титанового сплава ВТ-3 с размерами полости, которые определяются размерами пуансона (рис. 4) и зазором между пуансоном и матрицей. На рис. 5 изображено промежуточное и конечное состояние заготовки при вытяжке. На рис. 6 показана зависимость усилия деформирования от перемещения матрицы. Максимальное усилие составляет 1,3 МН, что позволяет выбрать соответствующее оборудование с учетом необходимой работы деформации.

Установлено, что в процессе вытяжки происходит утонение в опасном сечении — в месте перехода стенки изделия в донную часть на радиусе закругления пуансона (рис. 5, б). Этот процесс неконтролируемый также при вытяжке изделий из заготовок постоянной толщины, поэтому спрогнозировать его количественное значение без экспериментальной проверки практически невозможно. В месте утонения необходимо увеличить размеры (толщину) исходной заготовки для вытяжки,

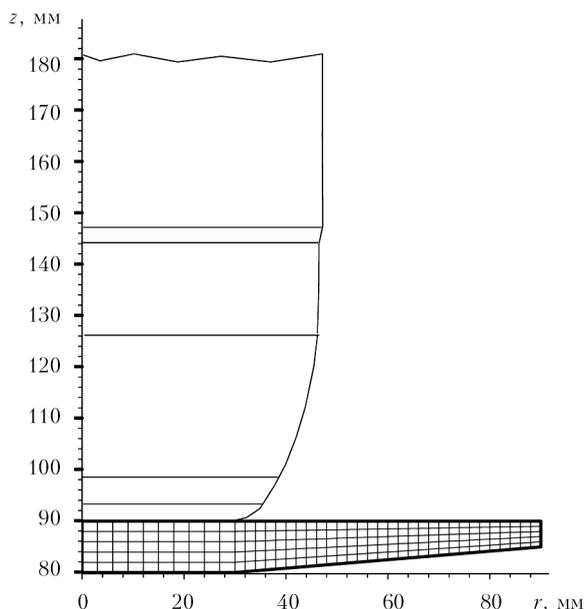


Рис. 4. Размеры исходной заготовки и пуансона

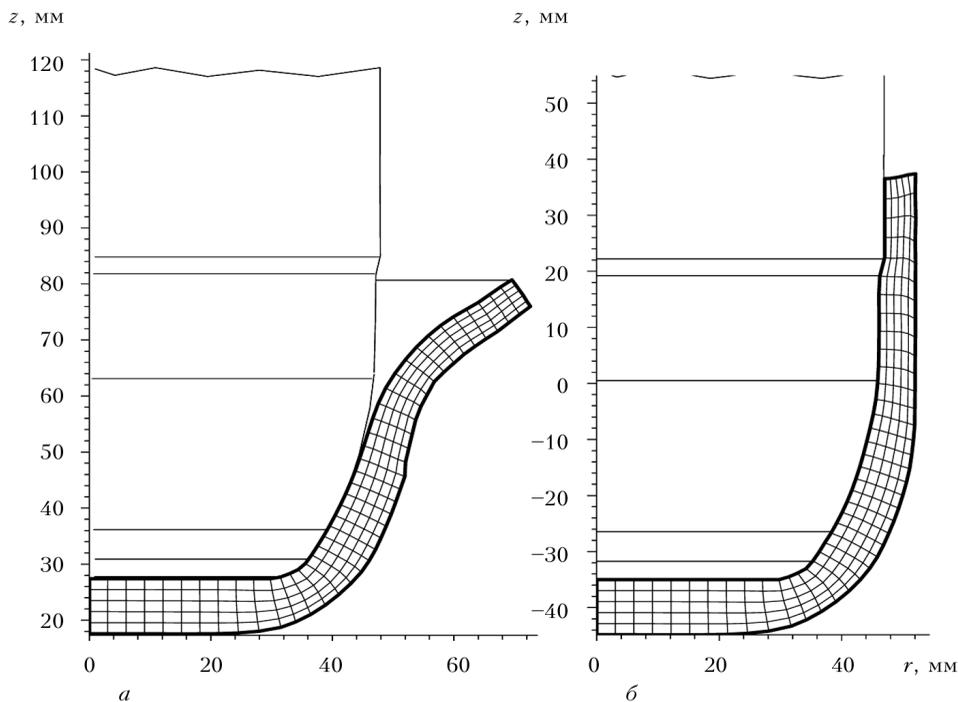


Рис. 5. Формообразование заготовки на переходном (а) и конечном (б) этапе вытяжки

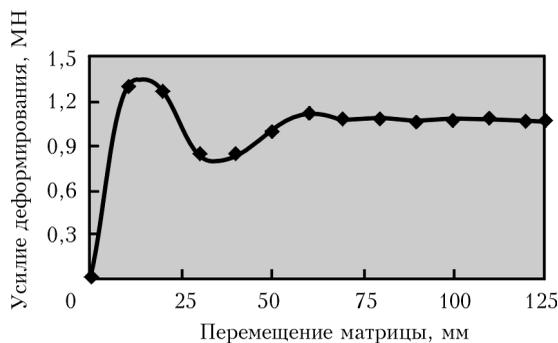


Рис. 6. Зависимость усилия деформирования от перемещения матрицы

которые компенсируют утонение [6]. Уточненная геометрическая форма заготовки для вытяжки без утонения показана на рис. 7. В результате моделирования получена геометрия изделия без утонения в опасном сечении (рис. 8). В результате проведенных расчетов,

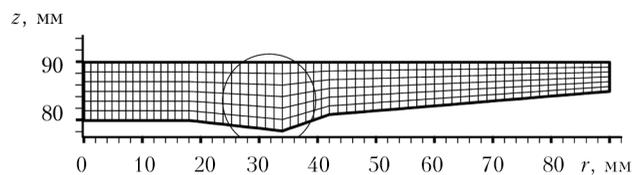


Рис. 7. Уточненная форма продольного сечения на симметричной половине заготовки для предотвращения утонения при вытяжке

разработанный пакет программ был усовершенствован рядом процедур, позволивших рассчитывать процесс вытяжки с компенсированием утонения в опасном сечении. По параметрам, полученным моделированием, разработана и внедрена технология изготовления изделия из титанового сплава (рис. 9).

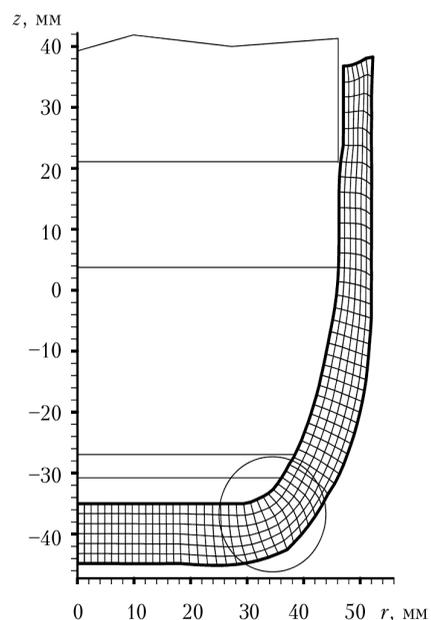


Рис. 8. Сформованная заготовка после вытяжки без утонения в опасном сечении



Рис. 9. Деталь, полученная по разработанной технологии

Моделирование вытяжки с утонением изделий с полостью простой и сложной конфигурации. Вытяжку с утонением используют для увеличения высоты изделия путем уменьшения толщины стенок. Любой процесс изготовления гильз состоит из определенного количества переходов вытяжки заготовки с утонением. Поэтому одним из определяющих факторов интенсификации технологических процессов является сокращение количества переходов благодаря усовершенствованию вытяжки и, как следствие, сокращению межоперационных обработок заготовки. На рис. 10 по левую сторону от оси симметрии показано исходное состояние заготовки гильзы, по правую сторону — после ее вытяжки. Заготовку 3, которую можно получить холодным обратным выдавливанием или вытяжкой, устанавливают на коническую поверхность матрицы 2, вытяжку выполняют с помощью перемещения пуансона 1. Ползунками 4 снимают сформованную заготовку с пуансона на обратном ходе. Целью проведения моделирования вытяжки с утонением изделий с полостью постоянного диаметра из низкоуглеродистой стали 11ЮА было определение влияния угла конуса матрицы на силовые режимы вытяжки, упрочнение и степень использования ресурса пластичности деформированного металла. На рис. 11 показано исходное состояние перед моделированием, промежуточное

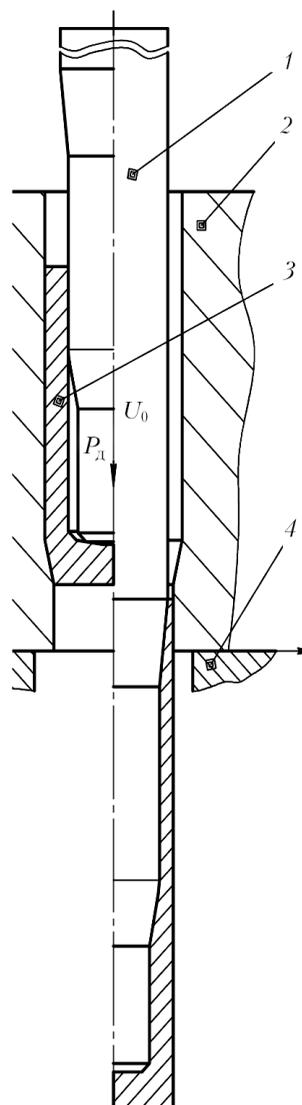


Рис. 10. Схема вытяжки с утонением (1–4 см. в тексте)

состояние при моделировании, конечное состояние после моделирования и экспериментальный образец, полученный В. И. Стеблюком и М. В. Орлюком. Результаты расчетов моделирования подтверждены экспериментами. Как видно из рис. 12, где приведены результаты расчетов по усилию вытяжки и коэффициенту упрочнения деформированного металла, минимальное усилие имеет место при угле конуса матрицы 24° . Максимальное упрочнение деформированного металла происходит при вытяжке в матрице с углом 32° . Более равномерное деформированное состояние по ширине стенки получено при углах конуса матрицы $12...20^\circ$.

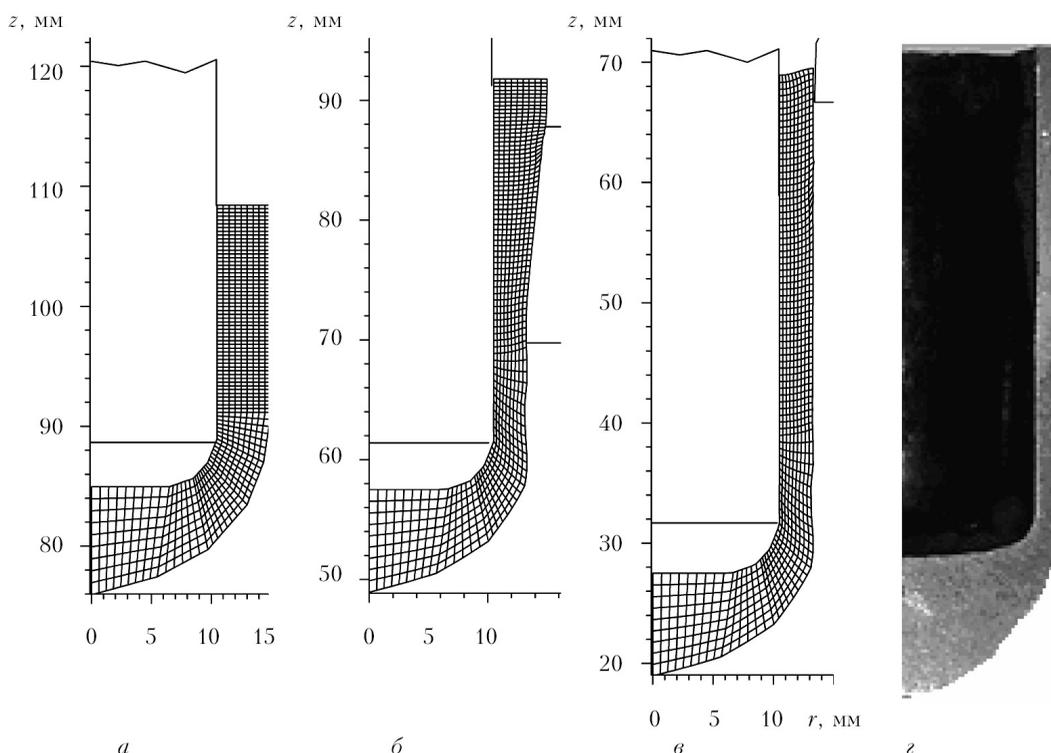


Рис. 11. Моделирование вытяжки, сопровождаемой утонением стенки изделий с полостью постоянного диаметра: а — исходное состояние; б — сформованная на 50 % заготовка; в — конечное состояние; г — продольное сечение экспериментального образца

Приведем результаты моделирования вытяжки с утонением изделий из высокоуглеродистой стали с полостью переменного диаметра. В процессе вытяжки проходит как обжатие цилиндрической поверхности пуансона, так и вытяжка с утонением с одновременным обжатием металла по внешним поверхностям пуансона. Размеры внешней поверхности пуансона выполнены таким образом, чтобы исключить дальнейшую механическую обработку изделия, а также с учетом утолщения стен-

ки при дальнейшем обжатии после вытяжки. Результаты моделирования приведены на рис. 13. Как видно из рисунка, получена зависимость величины вытяжки от перемещения пуансона. Расчетное максимальное значение усилия составило 150 кН. По распределению относительных радиальных напряжений на матрице при данном усилии рассчитано максимальное удельное усилие 1460 МПа на конической поверхности матрицы. Максимальное значение степени использования ре-

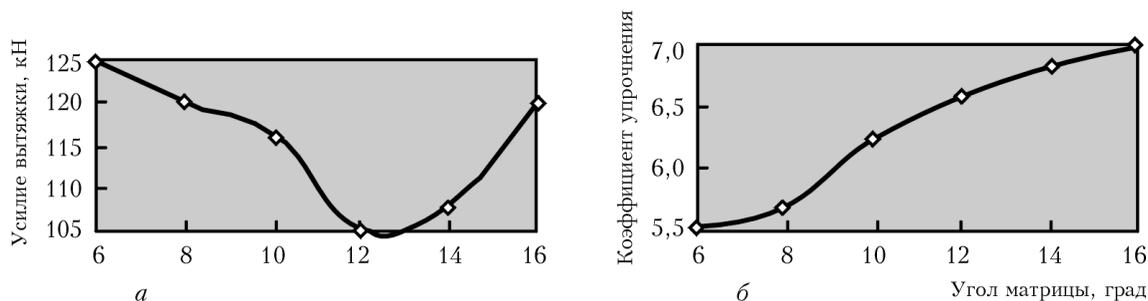


Рис. 12. Зависимость усилия вытяжки с утонением (а) и максимального коэффициента упрочнения $\sigma_s/\sigma_{0,2}$ в стенке (б) от угла матрицы

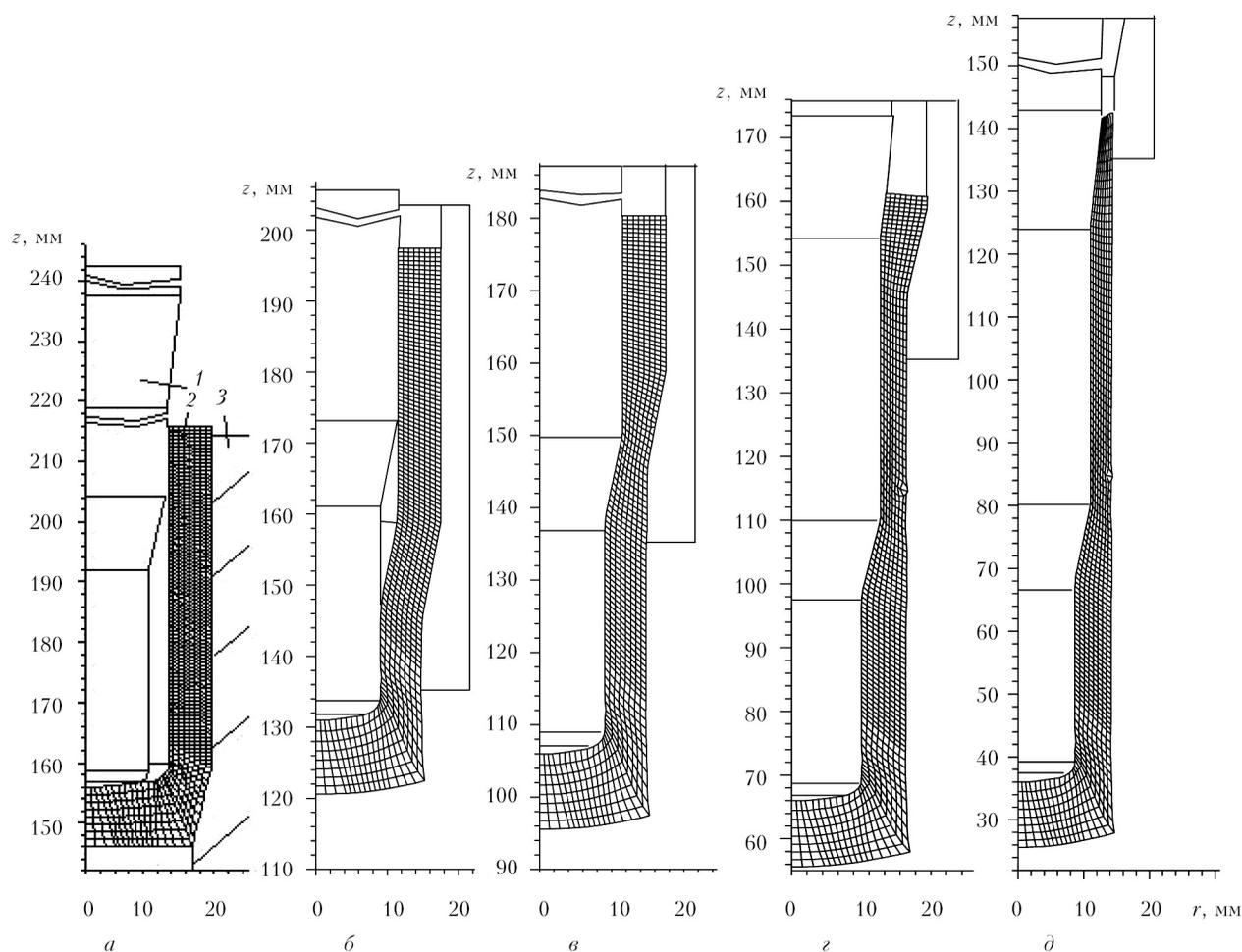


Рис. 13. Моделирование вытяжки с утонением и одновременным обжатием: а — исходное состояние (1 — пуансон; 2 — заготовка; 3 — матрица); б-д — этапы формообразования при перемещении пуансона на 25, 50, 90, 120 мм

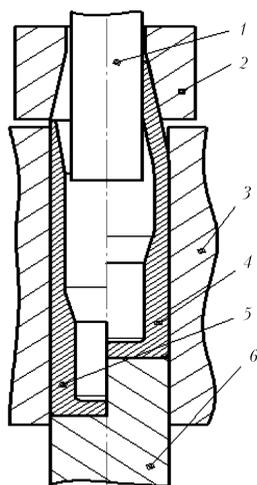


Рис. 14. Схема процесса обжатия: 1 — заготовка; 2 — контейнер; 3 — матрица; 4 — оправка; 5 — пуансон; 6 — заготовка после деформации (слева от оси симметрии показано исходное состояние перед обжатием, справа — после обжатия)

сурса пластичности 0,8 приходится на подвергающийся деформации металл в верхней части стенки изделия.

Моделирование процесса обжатия полых изделий. Обжатие используется в каждом процессе изготовления гильз для стрелковых боеприпасов с целью уменьшения диаметра гильзы под пулю. Расчетный анализ выполняли для определения силовых режимов, удельных усилий и особенно геометрии изделий, так как при обжатии имеет место утолщение части деформируемой заготовки. Кроме того, необходимо было установить возможность потери устойчивости и продольный изгиб стенки заготовки из высокоуглеродистой стали при данных соотношениях размера заготовки и деформирующего инструмента. Процесс обжатия, схема которого приведена

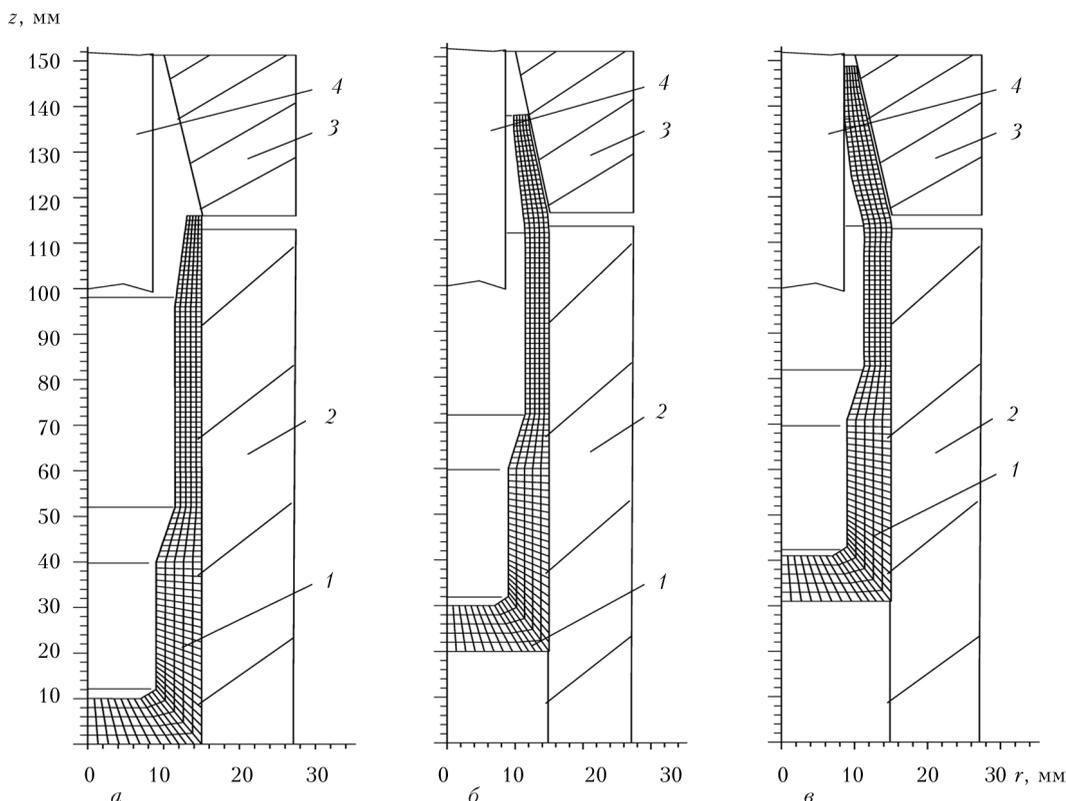


Рис. 15. Исходное (а), промежуточное (б) и конечное (в) состояние заготовки при моделировании обжатия путем перемещения пуансона на 20 и 31 мм: 1–4 — то же, что и на рис. 14

на рис. 14, выполняли путем воображаемого перемещения пуансона. Исходное, промежуточное и конечное состояние заготовки при моделировании приведено на рис. 15. Установлена геометрия, которую должно иметь изделие после обжатия. Расчетное максимальное усилие 200 кН получено в конце процесса. По распределению радиальных напряжений, которые должны иметь место на контактирующей поверхности матрицы и заготовки, определено максимальное значение удельного усилия — 1500 МПа. Установлено также распределение компонент относительных напряжений, деформаций и степени использования ресурса пластичности по всему объему сформированной заготовки (рис. 16).

Для прогнозирования механических свойств металла в стенке изделия имеем распределение относительной интенсивности напряжений. Так, верхняя часть стенки после обжатия упрочняется в 1,5...1,65 раза в сравнении с исходным состоянием, нижняя часть стенки — в 1,1...1,25 раза (условный предел те-

кучести, который прогнозируется в указанных местах, составляет 570...619 и 470 МПа соответственно). В стенке изделия возникают растягивающие осевые и сжимающие тангенциальные деформации, степень использования ресурса пластичности в верхней части стенки достигает значения 0,25.

Для всех рассмотренных процессов по результатам расчетов была спроектирована и изготовлена штамповая оснастка для изготовления гильз артиллерийских (рис. 17) и стрелковых (рис. 18) боеприпасов.

Выводы

1. На приведенных примерах моделирования процессов холодной листовой штамповки МКЭ были показаны возможности созданного пакета прикладных программ для определения параметров новых ресурсосберегающих технологических процессов на стадии проектирования с целью получения изделий специального назначения (гильз для артилле-

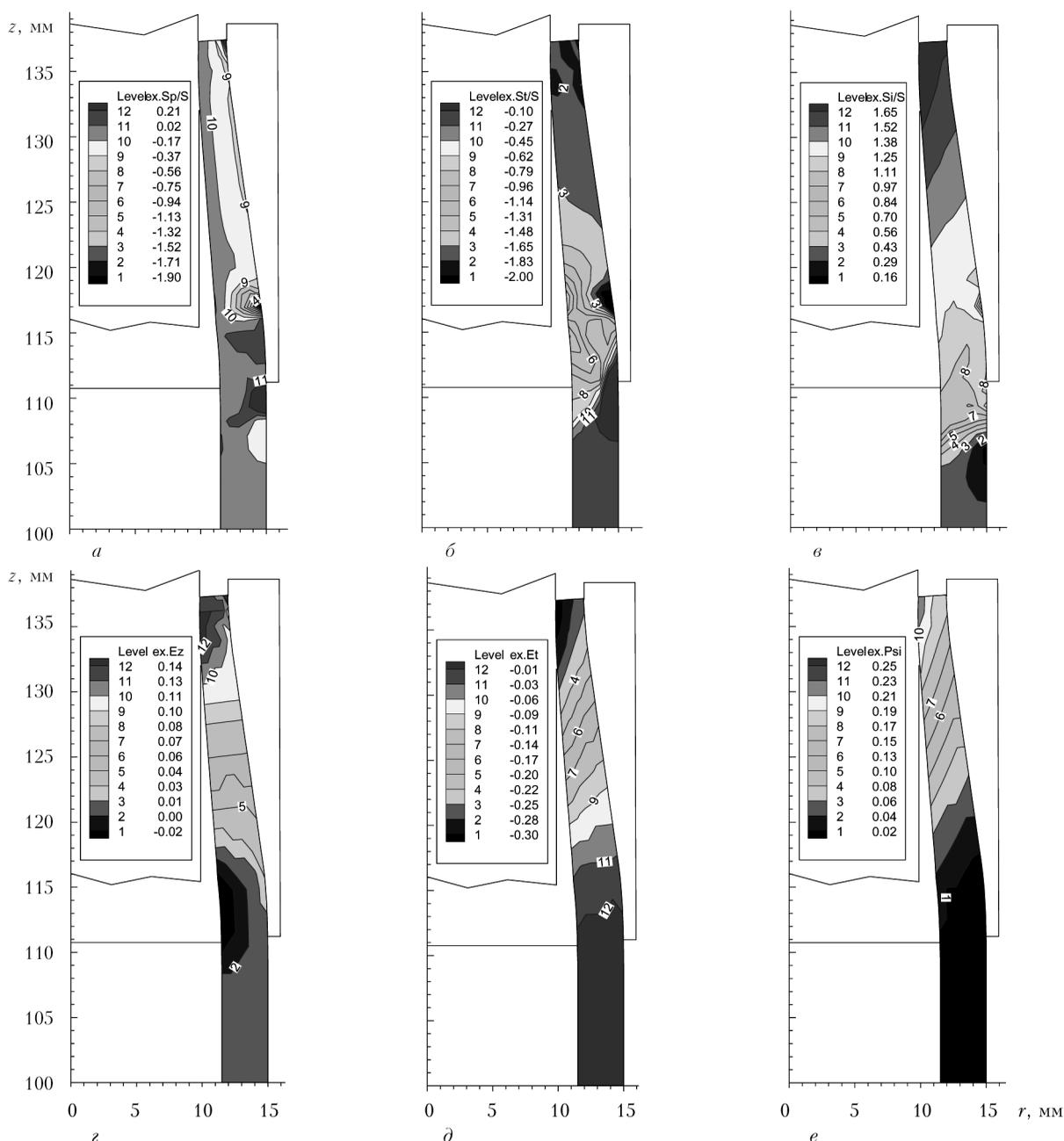


Рис. 16. Распределение относительных радиальных (а), тангенциальных (б) напряжений и их интенсивность (в), а также осевых (г), тангенциальных (д) деформаций и степени использования ресурса пластичности (е) по объему сформованной заготовки

рийских и стрелковых боеприпасов), необходимых размеров с заданными или прогнозируемыми механическими свойствами.

2. При моделировании процессов штамповки, которые распределяются на определенное количество шагов нагружения, учтены такие важные факторы, как технологическая наследственность между переходами формооб-

разования изделий, неконтролируемое утонение заготовок в опасном сечении, выявление разрушения металла при холодной деформации и разгрузка металла после пластической деформации.

3. Расчетным путем определены силовые режимы штамповки и работа деформации для выбора кузнечно-прессового оборудования,



Рис. 17. Артиллерийская гильза

точное распределение удельных усилий на деформирующем инструменте для расчетов на прочность, напряженно-деформированное состояние по всему объему сформованных заготовок для прогнозирования качества изделий. Показателями качества изделий после моделирования является их конечная геометрия, упрочнение и степень использования ресурса пластичности металла, подвергшегося деформации.

4. Результаты моделирования дали возможность усовершенствовать существующие и



Рис. 18. Последовательность изготовления гильзы калибра 12,7 мм

разработать новые технологические процессы холодной листовой штамповки изделий специального назначения разной конфигурации и спроектировать необходимую штамповую оснастку. 🗨

1. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. — М.: Наука, 1980. — 256 с.
2. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др. / Под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. — М.: Машиностроение, 1983. — 598 с.
3. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. — Киев: Виц. шк., 1983. — 175 с.
4. Стеблюк В. І., Калюжний В. Л., Калюжний О. В. Математичне моделювання процесу витягування з профільованої заготовки // Вест. НТУУ КПИ. Машиностроение. — 2004. — Вып.45. — С. 30–33.
5. Стеблюк В. І., Калюжний В. Л., Калюжний О. В. Математичне моделювання попереднього профілювання заготовки для витяжки виробів спеціального призначення // Технолог. системи. — 2002. № 3(14). — С. 50–53.
6. Стеблюк В. І., Калюжний О. В. Визначення потоншення та запобігання його утворення в небезпечному перерізі при витягуванні з профільованої заготовки // Сучасні проблеми металургії. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. — С. 496–498. — (Наукові вісті; Т. 8).