

# Применение деформирующего инструмента специального профиля для интенсификации процесса вытяжки в радиальных матрицах

В. Л. Калюжный • А. С. Ярмоленко

Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского, Киев, Украина

Received: 24 January 2020 / Accepted: 24 February 2020

**Аннотация.** Методом конечных элементов проведены расчетные исследования вытяжки осесимметричных полых изделий из низкоуглеродистой стали с использованием деформирующего инструмента специального профиля. Использована упруго-пластичная модель металла заготовки. Учтено трение по Кулону, упрочнение, скорость деформирования и тепловой эффект при холодном формоизменении. Специальный профиль инструмента представляет собой волнистые поверхности, которые образованы пересечением торцов с одинаковым диаметром сечения, расположенных с определенным шагом. Матрица и прижим специального профиля обеспечили снижение влияния сил трения на усилие вытяжки. Пуансон специального профиля создает тянущее усилие за стенку сформированной заготовки в зазоре между матрицей и пуансоном за счет заполнения металлом впадин на его боковой поверхности. На величину тянущего усилия происходит разгрузка донной части сформированной заготовки. Выглаживание выступов на внутренней поверхности сформированной заготовки осуществляется при обратном перемещении пуансона специального профиля и снятии изделия с пуансона. Использование инструмента специального профиля обеспечило снижение количества переходов вытяжки конкретного изделия из низкоуглеродистой стали в два раза. При этом получена возможность осуществления вытяжки с утонением стенки, что обеспечило уменьшению разнотолщинности стенки по высоте. Установлена возможность вытяжки пуансоном с радиусом закругления, который в два раза меньше по сравнению с вытяжкой традиционным инструментом. Это исключает дополнительную операцию калибровки изделий после вытяжки. Для рассмотренных вариантов вытяжки с разными зазорами между матрицей и пуансоном установлены зависимости усилий вытяжки, усилий на прижимах и усилий снятия изделий с пуансонов от перемещения деформирующего инструмента. Выявлено напряженно-деформированное состояние заготовок и температура деформированного металла. Особое внимание уделено осевым растягивающим напряжениям, которые являются основной причиной отрыва донной части изделий. Определены форма и размеры изделий после вытяжки.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, вытяжка, листовая заготовка, низкоуглеродистая сталь, инструмент специального профиля, усилие вытяжки, усилие прижима, осевые напряжения, интенсивность деформаций, форма и размеры изделий.

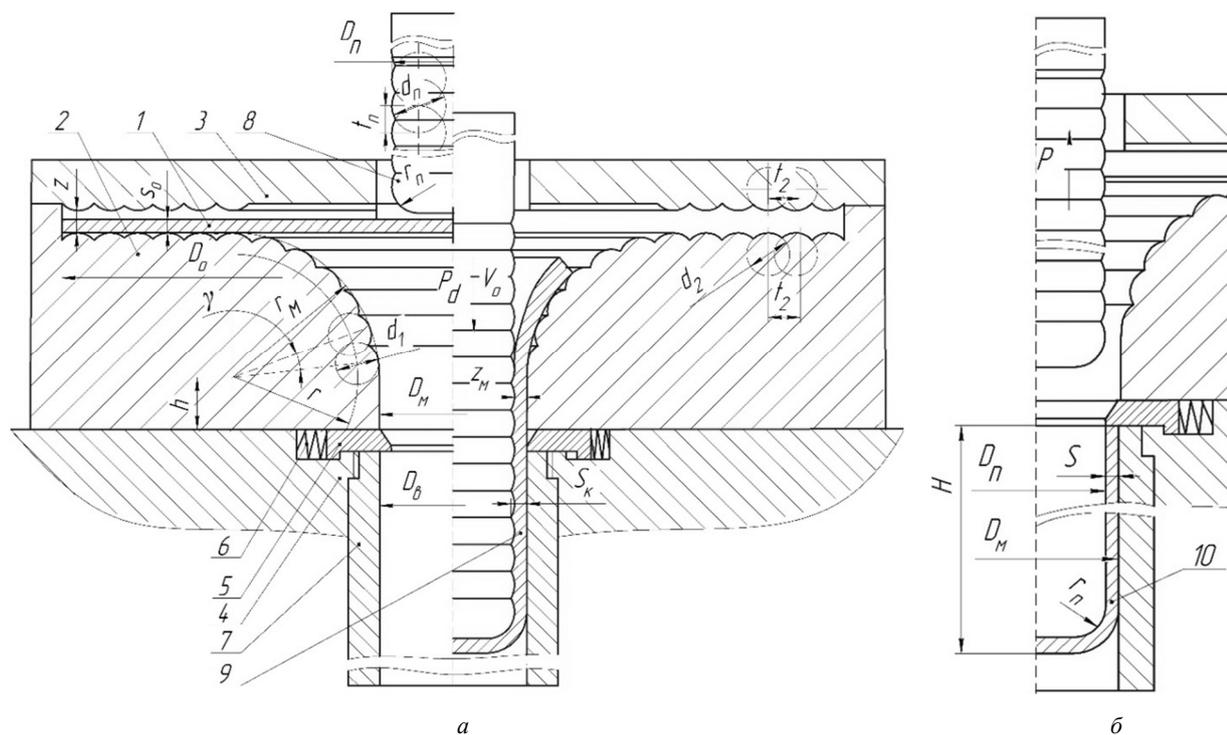
## Введение

Вытяжка полых изделий из листовых заготовок является широко распространенным процессом для изготовления изделий разнообразной конфигурации. Существуют различные способы вытяжки – вытяжка в радиальных матрицах, вытяжка в конических матрицах, гидромеханическая вытяжка, вытяжка с радиальным подпором фланца заготовки с помощью жидкости и другие. В настоящее время в основном используют вытяжку в радиальных матрицах и конических матрицах. Параметры вытяжки определяются на основе экспериментальных данных и производственного опыта [1–3]. Современное производство изделий вытяжкой выдвигает требования в направлении повышения производительности и точности формы и размеров изделий. Повышение производительности можно осуществить за счет сокращения количества переходов штамповки вытяжкой, а улучшение точности можно достичь путем уменьшения зазоров между матрицей и пуансоном или созданием условий для выполнения вытяжки с утонением стенки. При вытяжке в радиальных матрицах ограничением для осуществления за один переход являются значительные растягивающие напряжения, которые возникают в стенке сформированной заготовки в местах выхода из радиуса закругления матрицы и на радиусе закругления пуансона. Эти напряжения приводят до отрыва фланца или донной части заготовки [4]. Одним из способов снижения растягивающих напряжений является уменьшение влияния сил трения на деформирующем инструменте за счет использования инструмента специального профиля. Эффективность

применения такого инструмента в формоизменяющих процессах листовой штамповки показана в работах [5–6]. Вторым способом существенного снижения растягивающих напряжений является создание дополнительного тянущего усилия за стенку сформированной заготовки в зазоре между пуансоном и матрицей путем использования пуансона специального профиля [7]. На величину тянущего усилия происходит разгрузка донной части заготовки и значительно снижается вероятность отрыва этой части. В литературных источниках отсутствуют данные по влиянию тянущего усилия на процесс вытяжки изделий из малоуглеродистых сталей.

**Целью работы** является сокращение количества переходов вытяжки в радиальных матрицах и повышение точности формы и размеров изделий за счет применения деформирующего инструмента специального профиля.

Схема формообразования полых изделий вытяжкой с использованием деформирующего инструмента специального профиля приведена на рис. 1. На рис. 1а показана схема вытяжки. Слева от оси симметрии приведено положение в начале вытяжки, справа – в процессе вытяжки. Исходная листовая заготовка 1 установлена между матрицей 2 и прижимом 3. Деформирующая поверхность матрицы на радиусе закругления



**Рис. 1.** Схема формообразования полых изделий вытяжкой с использованием деформирующего инструмента специального профиля: а – схема вытяжки, б – схема снятия изделия с пуансона

$r_m$  образована пересечением торцов с диаметром сечения  $d_1$ , центры которых размещены на радиусе  $r = r_m - d_1/2$  с шагом  $\gamma$  по углу. Плоские части матрицы 2 и прижима 3 образованы пересечением торцов с диаметром сечения  $d_2$  и расположенных с шагом  $t_2$ . Волнистые поверхности матрицы 2 и прижима 3 уменьшают площадь контакта с сформированной заготовкой и снижают влияние сил трения на усилие вытяжки. Вытяжка осуществляется пуансоном 8. Боковая поверхность пуансона образована пересечением торцов с диаметром сечения  $d_n$  и расположенных с шагом  $t_n$ . Матрица 2 размещена на плите 4. Под матрицей установлены подвижные съемники 5, которые опираются на пружины 6. В плиту 4 винчена обойма 7. Путем перемещения пуансона 8 происходит процесс вытяжки. При этом сформированная заготовка смещает подпружиненные съемники 5. При вытяжке в зазоре  $z_m$ , который меньше за толщину заготовки  $S_0$ , между цилиндрической поверхностью матрицы высотой  $h$  и пуансоном металл заполняет впадины глубиной  $S_k$  на боковой поверхности пуансона 8. За счет этого создается дополнительное тянущее усилие за стенку сформированной заготовки, на величину которого происходит разгрузка донной части заготовки и снижается вероятность ее отрыва. Выглаживание образованных выступов на внутренней поверхности изделия происходит при снятии его с пуансона усилием  $P$  (рис. 1б). При обратном перемещении пуансона 8 изделие 10

удерживается съёмниками 5, а обойма 7 не позволяет увеличиваться внешнему диаметру  $D_6 = D_M$  изделия при выглаживании выступов.

Покажем возможности вытяжки в радиальной матрице с использованием деформирующего инструмента специального профиля на примере формообразования конкретного изделия с размерами (см. рис. 1б):  $H \geq 120$  мм;  $S = 2,3 \div 2,9$  мм;  $r_n \leq 18$  мм;  $D_M = 108,5$  мм. Материал изделия – низкоуглеродистая сталь AISI 1008 COLD. Для получения такого изделия вытяжкой необходима листовая заготовка с размерами  $D_0 = 230$  мм и  $S_0 = 3$  мм. Для приведенных размеров коэффициент вытяжки составляет  $m = D_M / D_0 = 108,5 / 230 = 0,47$ , а относительная толщина заготовки –  $l = (S_0 / D_0)100 = (3 / 230)100 = 1,3$ . При такой величине  $l$  согласно данных В.П. Романовского [1] за один переход вытяжку можно осуществить с коэффициентами  $m = 0,5 \div 0,53$ . Поэтому для изделия приведенных размеров необходимо минимум два перехода вытяжки.

Для определения параметров формообразования с применением метода конечных элементов (МКЭ) и программы DEFORM было проведено моделирование вытяжки изделий из такой заготовки с использованием традиционного деформирующего инструмента и инструмента специального профиля. Металл заготовки считался изотропным, упруго-пластичным с упрочнением. Использованы цилиндрические координаты. Учтены трение по Кулону (коэффициент трения  $\mu = 0,08$ ), скорость деформирования  $V_0 = 7$  мм/сек и тепловой эффект при холодной деформации.

Сначала проведен расчетный анализ вытяжки с использованием традиционного деформирующего инструмента. Матрица и пуансон были следующих размеров (по обозначениям см. рис. 1а): внешний диаметр  $D_n = 101,9$  мм; радиус закругления  $r_n = 18$  мм; диаметр матрицы  $D_M = 108,5$  мм; радиус закругления  $r_M = 24$  мм; высота  $h = 4$  мм. Зазоры  $z_M = 3,3$  мм и  $z = 3,8$  мм. Установлено, что вытяжкой традиционными пуансоном и матрицей получить изделие за один переход невозможно. Результаты моделирования приведены на рис. 2. Тут и далее размеры по осям показаны в миллиметрах, а тонкими линиями изображен деформирующий инструмент. При вытяжке в сформированной заготовке возникают значительные растягивающие напряжения. Наибольшие растягивающие радиальные напряжения возникают в стенке на радиусе закругления пуансона и

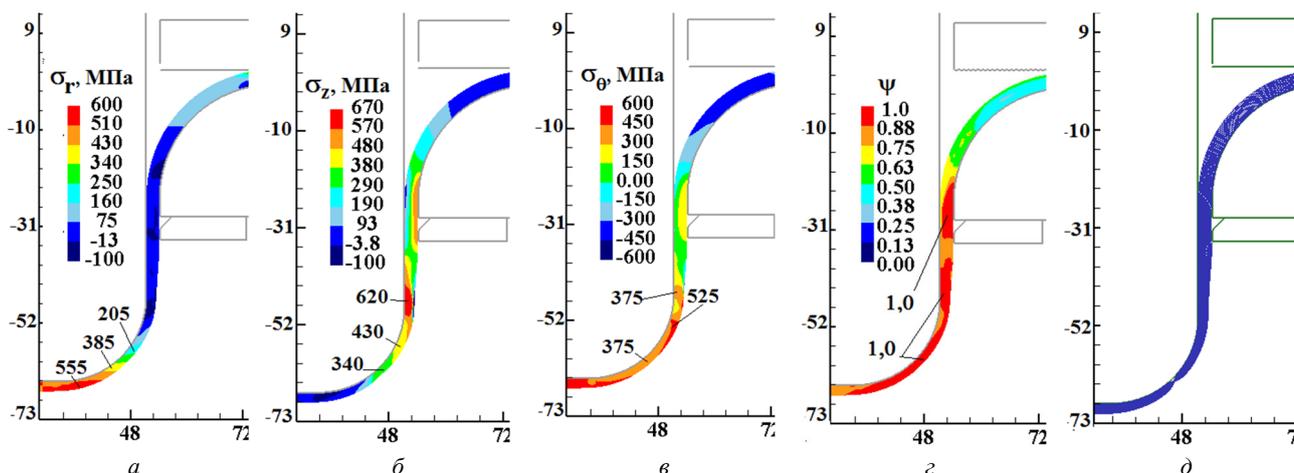


Рис. 2. Результаты моделирования вытяжки традиционным инструментом: а–е – распределение компонент напряжений  $\sigma_r$ ,  $\sigma_z$  и  $\sigma_\theta$ ; з – распределение степени использования ресурса пластичности  $\psi$ , д – отрыв донной части

и достигают значений  $\sigma_r = 205 \div 555$  МПа (рис. 2а). Осевые растягивающие напряжения величиной  $\sigma_z = 620$  МПа возникают в стенке вначале перехода в донную часть сформированной заготовки (рис. 1б). Большие тангенциальные растягивающие напряжения  $\sigma_\theta = 375 \div 525$  МПа также возникают в стенке на радиусе закругления пуансона. Действие таких растягивающих напряжений приводит к быстрому утонению стенки на радиусе закругления пуансона и исчерпанию степени использования ресурса пластичности  $\psi$  сформированного металла в этом месте (рис. 1з). В нем получено значение  $\psi = 1$ , при котором происходит разрушение. Отрыв донной части сформированной заготовки происходит при величине усилия  $P_d = 400$  кН и приведен на рис. 1д. При этом в цилиндрической части стенки сформированной заготовки такая величина  $\psi$  не распространяется на всю толщину стенки, поэтому разрушение не происходит.

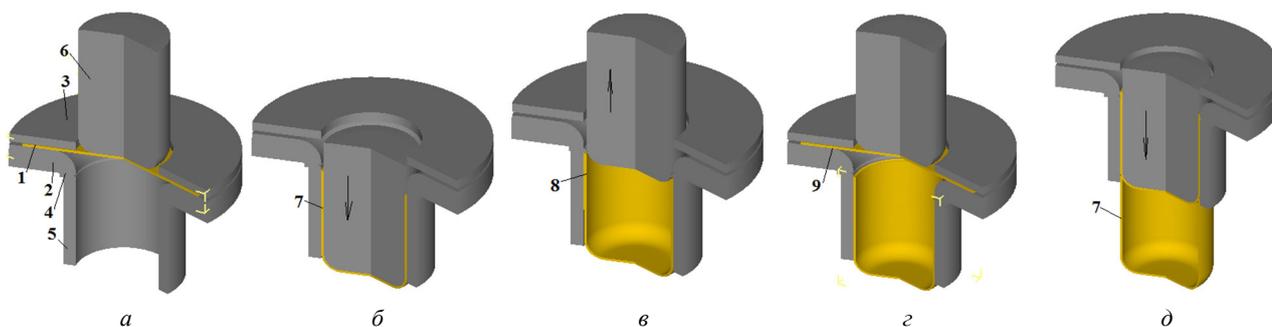
Далее приведены результаты моделирования вытяжки аналогичного изделия деформирующим инструментом специального профиля с различной величиной зазора  $z_M$ . Матрица специального профиля имела следующие размеры (см. рис. 1а):  $D_0 = 108,5$  мм;  $r_M = 24$  мм;  $d_1 = 8$  мм;  $\gamma = 2,5^\circ$ ;  $h = 4$  мм  $z = 3,8$  мм. Диаметр

пуансона специального профиля выбирался в зависимости от величины зазора  $z_m$ : для  $z_m = 2,9$  мм –  $D_n = 102,7$  мм; для  $z_m = 2,8$  мм –  $D_n = 102,9$  мм; для  $z_m = 2,7$  мм –  $D_n = 103,1$  мм. Другие размеры пуансона:  $r_n = 18$  мм;  $d_n = 8$  мм;  $t_n = 1$  мм. Размеры профилей плоских частей матрицы и прижима:  $d_2 = 8$  мм;  $t_2 = 1$  мм. Для рассмотренных случаев вытяжки с использованием инструмента специального профиля выполнено моделирование МКЭ непосредственно вытяжки и процессов выглаживания выступов и снятия изделий с пуансонов. Применение такого деформирующего инструмента обеспечило получение изделий за один переход.

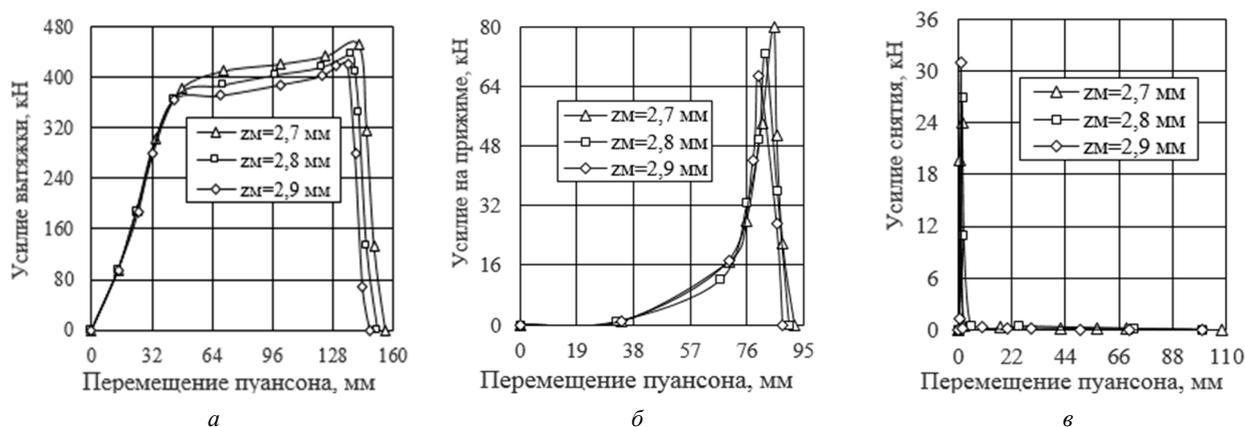
На рис. 3 представлены расчетные схемы формообразования изделия вытяжкой с использованием инструмента специального профиля. Схема в начале вытяжки приведена на рис. 3а. Исходная заготовка 1 установлена между матрицей 2 и прижимом 3. Под матрицей 2 расположены съемники 4 и обойма 5. Вытяжка осуществляется пуансоном 6. На рис. 3б показана схема в конце вытяжки с получением сформированной заготовки 7 с выступами на внутренней боковой поверхности. Схема после выглаживания выступов и снятия изделия 8 с пуансона 6 приведена на рис. 3в. На рис. 3г представлена схема в начале вытяжки второй заготовки 9, после деформирования которой происходит выталкивание изделия 7 из обоймы 5.

Моделированием определены силовые режимы при вытяжке и снятии изделий с пуансонов, напряжения и деформации в заготовках, форма и размеры изделий. На рис. 4 представлены силовые режимы вытяжки и снятия изделий. Зависимости усилий вытяжки от перемещения пуансонов при формообразовании с разными зазорами  $z_m$  показаны на рис. 4а. Уменьшение зазора на 0,1 мм приводит к возрастанию усилия на 4 %.

Разные перемещения пуансонов получены по причине увеличения высоты изделий при вытяжке с разными зазорами. Также увеличиваются усилия, которые возникают на прижимах при вытяжке (рис. 4б). Максимальные усилия на прижимах возникают при выходе фланцев сформированных заготовок из зазоров



**Рис. 3.** Расчетные схемы формообразования вытяжкой изделия инструментом специального профиля: а – в начале вытяжки, б – в конце вытяжки, в – после снятия изделия с пуансона, г – в начале вытяжки второй заготовки, д – в конце вытяжки второй заготовки и выталкивания изделия из обоймы



**Рис. 4.** Силовые режимы вытяжки и снятия изделий: а – зависимости усилия вытяжки от перемещения пуансона, б – зависимости усилия на прижиме от перемещения пуансона, в – зависимости усилия снятия изделий от перемещения пуансона

между матрицами и прижимами. Зависимости усилий снятия изделий от обратного перемещения пуансонов, при котором происходит выглаживание выступов на внутренних поверхностях сформированных заготовок, представлены на рис. 4в. Наибольшие значения усилий снятия получены вначале обратного перемещения пуансонов. Если разделить пуансон на две части (см. рис. 1а) – донную часть, которая заканчивается радиусом закругления  $r_n$ , и верхнюю часть с профильной боковой поверхностью, то моделированием можно установить усилия на этих составных частях. На рис. 5 приведены графики усилий, которые воспринимает донная часть пуансона и профильная боковая поверхность пуансона при вытяжке. Усилие на боковой поверхности представляет собой тянущее усилие за стенку сформированной заготовки. При достижении усилия на донной части 370 кН (перемещение пуансона достигает 50 мм) начинает действовать тянущее усилие за стенку заготовки, что обеспечивает исключение утонения стенки на радиусе закругления пуансона и предотвращает, отрыв донной части в отличие от вытяжки традиционным инструментом. В дальнейшем усилие на донной части снижается, а тянущее усилие возрастает и достигает максимума 168 кН при перемещении пуансона 132 мм. При сложении этих двух графиков можно получить вышенаведенную результирующую зависимость усилия от перемещения пуансона (см. рис. 4а).

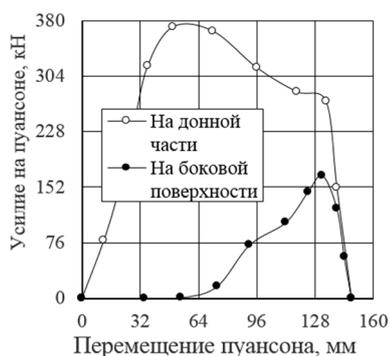


Рис. 5. Составляющие усилия на пуансоне при вытяжке из зазором  $z_m=2,9$  мм

Напряженное состояние и температура сформированного металла установлены при максимальном усилии вытяжки, которое возникает в момент втягивания торца сформированной заготовки в зазор  $z_m$  между матрицей и пуансоном. Распределения компонент напряжений и температуры в сформированной заготовке при вытяжке с зазором  $z_m=2,9$  мм приведены на рис. 6. Наибольшие растягивающие радиальные напряжения возникают в стенке на радиусе закругления и достигают значений в пределах  $\sigma_r=75 \div 290$  МПа (рис. 6а), что приблизительно в 2 раза меньше по сравнению с вытяжкой традиционным деформирующим инструментом (см. рис. 2а). Также существенно уменьшаются растягивающие осевые напряжения  $\sigma_z$  (рис. 6б). В стенке цилиндрической части уменьшение составило в 1,9 раз, в стенке на радиусе закругления пуансона – в 1,6 раз. Более чем в 2 раза в донной части сформированной заготовки снижаются растягивающие тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$  (рис. 6в).

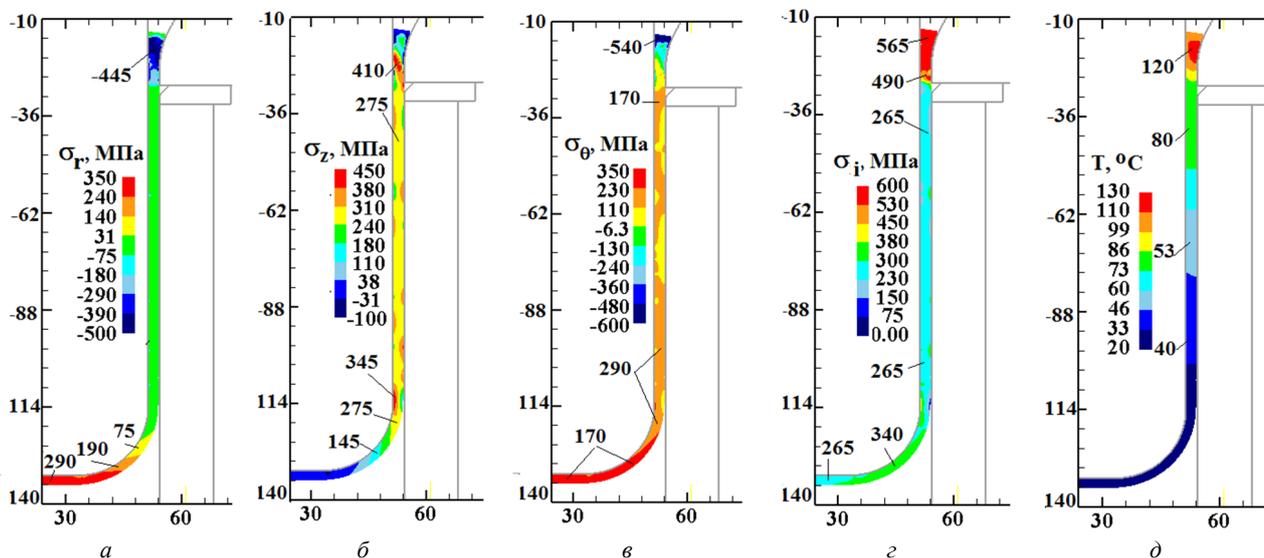
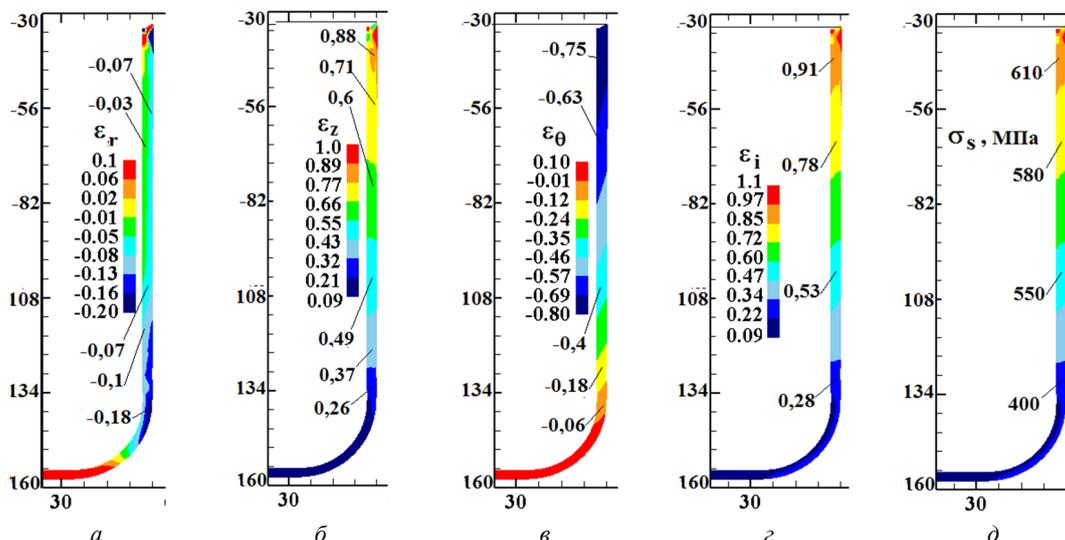


Рис. 6. Распределения компонент напряжений и температуры в сформированной заготовке при вытяжке с зазором  $z_m=2,9$  мм: а – распределение  $\sigma_r$ , б – распределение  $\sigma_z$ , в – распределение  $\sigma_\theta$ , г – распределение  $\sigma_i$ , д – распределение температуры  $T^\circ\text{C}$

Наибольшая величина интенсивности напряжений  $\sigma_i=565$  МПа возникает в области торца заготовки (рис. 6г). Таким образом, применение деформирующего инструмента специального профиля приводит к значительному уменьшению растягивающих напряжений в сформированных заготовках и особенно осевых напряжений, которые являются причиной разрушения заготовок при вытяжке. В процессе вытяжки повышается температура

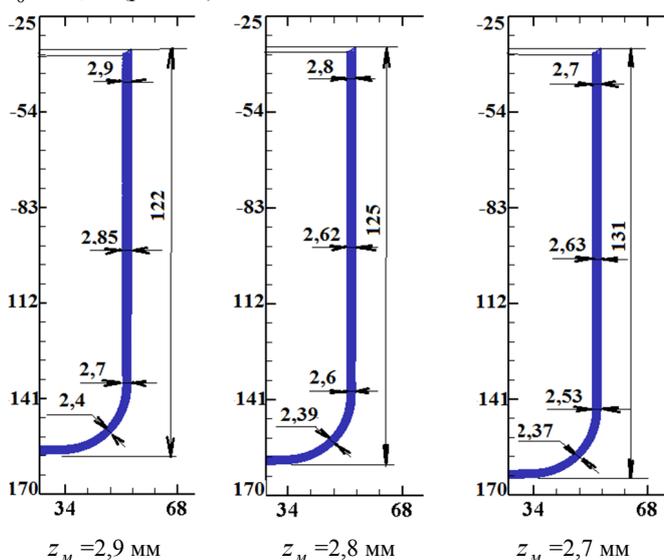
сдеформированного металла, распределение которой приведено на рис. 6д. В области торца сдеформированной заготовки получено  $T = 120^{\circ}\text{C}$ . Выявленная температура при холодном формообразовании позволяет уточнить требования к смазкам для вытяжки.

Деформированное состояние установлено после выглаживания выступов на внутренней поверхности изделий и снятия их с пуансонов. На рис. 7 представлены распределения компонент деформаций в



**Рис. 7.** Распределения компонент деформаций и спрогнозированного напряжения текучести в изделии после вытяжки с зазором  $z_M = 2,9$  мм: *a* – распределение  $\epsilon_r$ , *б* – распределение  $\epsilon_z$ , *в* – распределение  $\epsilon_{\theta}$ , *г* – распределение  $\epsilon_i$ , *д* – распределение  $\sigma_s$

цилиндрической части стенки и в стенке на радиусе закругления. В цилиндрической части стенки возникают малые сжимающие радиальные деформации  $\epsilon_r$  (рис. 7а). На выходе из радиуса закругления эти деформации становятся растягивающими. После вытяжки получены большие растягивающие осевые деформации  $\epsilon_z$ . Наибольшие значения ( $\epsilon_z = 0,88$ ) имеют место в области торца изделия с последующим уменьшением по высоте до места перехода в радиус закругления, в котором получено  $\epsilon_z = 0,26$  (рис. 7б). Также после вытяжки возникают большие сжимающие тангенциальные деформации  $\epsilon_{\theta}$ . Они достигают следующих величин: в области торца стенки  $\epsilon_{\theta} = -0,75$ ; в средней части стенки  $\epsilon_{\theta} = -0,52$ ; в месте перехода в радиус закругления  $\epsilon_{\theta} = -0,06$  (рис. 7в).



**Рис. 9.** Форма и размеры изделий изделия после вытяжки с разными зазорами

В донной части изделия деформации  $\epsilon_{\theta}$  стают растягивающими. Деформации  $\epsilon_z$  и  $\epsilon_{\theta}$  вносят существенный вклад в интенсивность деформаций  $\epsilon_i$ , по которой можно оценить проработку структуры металла пластической деформаций и прогнозировать предел текучести сдеформированного металла. Распределение  $\epsilon_i$  представлено на рис. 7г. Наибольшая проработка имеет место в области торца стенки ( $\epsilon_i = 0,91$ ), наименьшая ( $\epsilon_i = 0,28$ ) – в месте перехода стенки в радиус закругления. По полученным значениям  $\epsilon_i$  и с использованием экспериментальной диаграммы истинных напряжений для стали AISI 1008 COLD можно спрогнозировать предел текучести  $\sigma_s$  сдеформированного металла по высоте стенки. Установленные величины  $\sigma_s$  показаны на рис. 7д. По высоте стенки предел текучести сдеформированного металла находится в

пределах  $\sigma_s = 400 \div 610$  МПа.

На рис. 9 представлены форма и размеры изделий, которые получены вытяжкой с разными зазорами  $z_m$ . Величина зазора влияет на форму и размеры изделий. Уменьшение зазора приводит к незначительному возрастанию утонения стенки на радиусе закругления пуансона и снижению разнотолщинности стенки по высоте.

Таким образом, вторым преимуществом применения деформирующего инструмента специального профиля при вытяжке в радиальных матрицах является повышение точности формы и размеров изделий за счет снижения разнотолщинности стенок по высоте, а также увеличение высоты изделий, которые можно получить за один переход.

Покажем еще одно преимущество использования такого инструмента. При вытяжке традиционным пуансоном радиус закругления его при рассмотренной относительной толщине  $l = 1,3$  по данным источника [1] должен быть  $r_n = (5 \div 6) S_0 = (15 \div 18)$  мм. Когда нужно получить изделие с меньшим радиусом  $r_n$ , после вытяжки

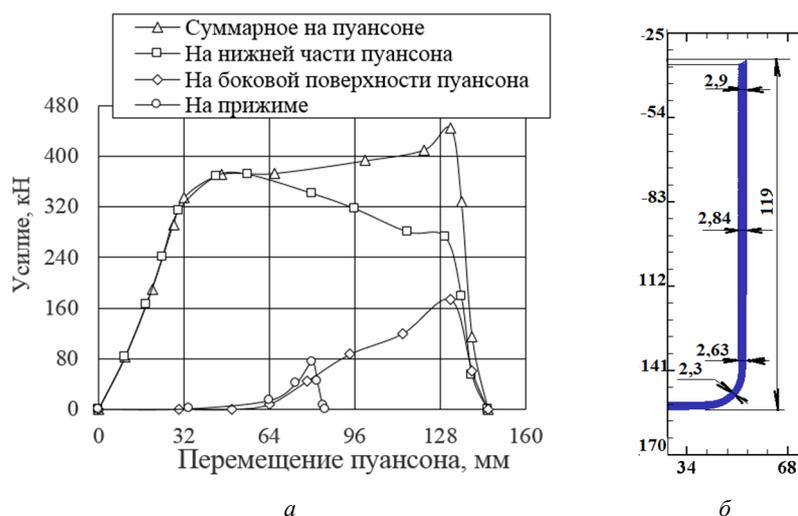


Рис. 10. Результаты моделирования вытяжки из зазором  $z_m = 2,9$  мм пуансоном специального профиля с радиусом закругления  $r_n = 9$  мм: а – силовые режимы, б – форма и размеры изделия

используют дополнительную операцию калибровки. Было проведено моделирование вытяжки с зазором  $z_m = 2,9$  мм вышеприведенным пуансоном специального профиля, в котором радиус закругления был  $r_n = 3$  мм,  $S_0 = 9$  мм. Результаты моделирования представлены на рис. 10. На рис. 10а показаны силовые режимы вытяжки. На графиках приведена суммарная зависимость усилия вытяжки от перемещения пуансона. Максимальное усилие вытяжки достигает 444 кН при перемещении пуансона 132 мм. Также показаны зависимости составляющих этого усилия, которые возникают на нижней части и боковой поверхности пуансона. На нижней части получена максимальная величина усилия 370 кН при перемещении пуансона 48 мм, на боковой

поверхности – 174 кН при перемещении пуансона 132 мм. На прижиме усилие достигает значения 75 кН. На рис. 10б представлены форма и размеры изделия. Уменьшение радиуса закругления с  $r_n = 18$  мм до  $r_n = 9$  мм приводит до незначительного уменьшения толщины стенки на радиусе закругления пуансона и небольшого увеличения разнотолщинности стенки по высоте. Также уменьшается высота изделия по сравнению с изделием после вытяжки пуансоном с  $r_n = 18$  мм (см. рис. 9). Таким образом, использование деформирующего инструмента при вытяжке позволяют существенно уменьшить радиус закругления пуансона и исключить дополнительную операцию калибровки изделий после вытяжки.

## Выводы

Моделированием методом конечных элементов установлены параметры вытяжки осесимметричных изделий из низкоуглеродистой стали деформирующим инструментом специального профиля. Специальный профиль инструмента обеспечивает снижение влияния сил трения на усилие вытяжки и создание тянущего усилия за стенку сформированной заготовки в зазоре между пуансоном и матрицей. Установлено, что использование такого деформирующего инструмента приводит к существенному уменьшению растягивающих напряжений при вытяжке и сокращению количества переходов вытяжки в два раза. За счет обеспечения уменьшения зазора между матрицей и пуансоном при вытяжке достигнуто повышение точности формы и размеров изделий та увеличение высоты изделий. Показана возможность существенного уменьшения радиуса закругления пуансона при вытяжке инструментом специального профиля, что исключает дополнительную операцию калибровки изделий после вытяжки.

## References

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., пераб. и доп. / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т.; Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (предс.) и др. – М.: Машиностроение, 1985–1987. – Т. 4. – 544 с.
3. Аверкиев Ю.А. Холодная штамповка / Ю. А. Аверкиев., А. Ю. Аверкиев. – М: Машиностроение, 1989. – 304 с
4. Попов Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 480 с.
5. Кривошеин В.А. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных при исследовании процесса обжима в матрице с кольцевыми канавками / В.А. Кривошеин // Известия вузов: Машиностроение. – 2014. – №5. – С. 10–12.
6. Калюжный А.В. Интенсификация формообразующих процессов холодной листовой штамповки / А.В. Калюжный, В.Л. Калюжный. – К: ТОВ “Сик Груп Україна”, 2015. – 292 с.
7. Калюжный В.Л. Влияние радиуса закругления пуансона специального профиля на вытяжку осесимметричных изделий с листовой заготовки из нержавеющей стали / В.Л. Калюжный, К.К. Редька // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. Харьков: НТУ «ХПИ». 2018. – №31(1307). – С. 45–50. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/41136>

## Застосування деформуючого інструменту спеціального профілю для інтенсифікації процесу витяжки в радіальних матриці

В. Л.Калюжный, А. С. Ярмоленко

**Анотація.** Методом скінченних елементів проведено розрахункові дослідження витягування вісесиметричних порожнистих виробів із низьковуглецевої сталі із застосуванням деформуючого інструменту спеціального профілю. Використана пружно-пластична модель металу заготовки. Враховано тертя по Кулону, зміцнення, швидкість деформування, тепловий ефект при холодній формозміні. Спеціальний профіль інструменту утворений перетином торів з однаковим діаметром перетину, які розташовані з певним кроком. Матриця і притискач спеціального профілю забезпечують зниження впливу сил тертя на зусилля витягування. Пуансон спеціального профілю створює тягуче зусилля за стінку zdeформованої заготовки в зазорі між матрицею і пуансоном за рахунок заповнення металом впадин на його боковій поверхні. На величину тягучого зусилля відбувається розвантаження донної частини zdeформованої заготовки. Вигладжування виступів на внутрішній поверхні zdeформованої заготовки виконується при зворотному переміщенні пуансона і зніманні виробу з нього. Застосування інструменту спеціального профілю забезпечило зниження кількості переходів витягування конкретного виробу в два рази. При цьому отримана можливість виконання витягування з потоншенням стінки, що забезпечило зменшення різновисочності стінки по висоті. Встановлена можливість витягування пуансоном з радіусом заокруглення, який в два рази менший в порівнянні з витягування традиційним інструментом. Це виключає додаткову операцію калібрування деталей після витягування. Для розглянутих варіантів витягування з різними зазорами між матрицею і пуансоном встановлені залежності зусиль витягування, зусиль на притискачах і зусиль знімання виробів з пуансонів від переміщення деформуючого інструменту. Виявлений напружено-деформований стан заготовок і температура zdeформованого металу. Особливу увагу приділено осьовим розтягувальним напруженням, які являються основною причиною відриву донної частини виробів. Визначені форма і розміри виробів.

**Ключові слова:** метод скінченних елементів, витягування, листова заготовка, низьковуглецева сталь, інструмент спеціального профілю, зусилля витягування, зусилля на притискачі, осьові напруження, інтенсивність деформацій, Форма і розміри виробів.

## Application of a special profile deforming tool for intensification of the extrusion process in radial matrixes

V. Kaliuzhnyi, O. Jarmolenko

**Abstract.** Calculated analysis of the extraction of axisymmetric hollow products from low carbon steel using a special profile deforming tool were carried out by the Finite Element Method. An elastic-plastic model of the workpiece metal was used. Coulomb friction, hardening, deformation rate and thermal effect during cold forming are considered. A special profile of the tool is a wavy surface, which is formed by the intersection of tori with the same diameter of the section, located with a certain step. Special profile of the Matrix and the clamp provided a decrease in the effect of friction on the drawing force. The special profile punch creates a pulling force behind the wall of the deformed workpiece in the gap between the matrix and the punch due to the filling of cavities with metal on its side-surface. Unloading of the bottom of the workpiece occurs by the amount of pulling force. The smoothing of the protrusions on the inner surface of the deformed workpiece is carried out during the reverse movement of the punch of a special profile and removing the product. The use of a special profile tool has reduced the number of draw transitions for low-carbon steel

products by half. At the same time, it was possible to draw with thinning the wall, which provided a decrease in the wall thickness variations. Possibility of extraction by a punch with a radius of rounding, which is two times less in comparison with the extraction of a traditional tool. This eliminates the additional operation of calibrating products after drawing. For the considered options for drawing with different gaps between the die and the punch, the dependences of the drawing forces, the forces on the clamps and the forces of removing products from the punches are established. The stress-strain state of the workpieces and the temperature of the deformed metal were revealed. Particular attention is paid to axial tensile stresses, which are the main reason for the separation of the bottom of the product. The shape and dimensions of the products after drawing are determined.

**Keywords:** finite element method, drawing, sheet blank, low carbon steel, special profile tool, drawing force, pressing force, axial stress, strain rate, shape and dimensions of products

#### References

1. Romanovskii, V.P. (1979), *Spravochnik po kholodnoi shtampovke* [Cold Stamping Handbook], 6 th ed., revised and supplemented, Mashinostroenie, Leningrad, Russia.
2. Matveeva A.D. (ed.) (1985–1987), *Kovka i shtampovka: Spravochnik, Listovaya shtampovka* [Forging and stamping: Reference: Sheet stamping], in Semenov E.I. (ed.) and dr., vol. 4, no.4, Mashinostroenie, Moscow, Russia.
3. Averkiev, Yu.A. and Averkiev, A.Yu. (1989), *Kholodnaya shtampovka* [Cold stamping], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
4. Popov, E.A., Kovalev, V.G. and Shubin, I.N. (2000), *Tekhnologiya i avtomatizatsiya listovoi shtampovki* [Technology and automation of sheet stamping], MGTU im. N.E. Baumana, Moscow, Russia.
5. Krivoshein, V.A. (2014), “Sravnitel'nyi analiz teoreticheskikh i eksperimental'nykh dannykh pri issledovanii protsessa obzhima v matritse s kol'tsevymi kanavkami”, *Izvestiya vuzov, Izvestiya vuzov: Mashinostroenie*, no. 5, pp. 10–12.
6. Kalyuzhnyi, A.V. and Kalyuzhnyi, V.L. (2015), *Intensifikatsiya formoobrazuyushchikh protsessov kholodnoi listovoi shtampovki* [Intensification of forming processes of cold sheet stamping], TOV “Sik Grup Ukraina”, Kiev, Ukraine.
7. Kalyuzhnyi, V.L. and Red'ka, K.K. (2018), “Vliyaniye radiusa zakrugleniya puansona spetsial'nogo profilya na vytyazhku osesimmetrichnykh izdelii s listovoi zagotovki iz nerzhaveyushchei stali”, *Vestnik NTU “KhPI”, Seriya: Innovatsionnye tekhnologii i oborudovanie obrabotki materialov v mashinostroenii i metallurgii*, Khar'kov, no. 31(1307), pp. 45–50. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/41136>