

УДК 623.455:621.735.043.0163

Гуменюк Ю. И.
Лобов В. А.**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ С УТОНЕНИЕМ
СТЕНКИ ПО ВНУТРЕННЕМУ КОНТУРУ**

В различных отраслях промышленности (электротехника, радиотехника, приборостроение) используются детали имеющие фланец и развитую (сквозную или закрытую) втулочную часть. При постоянно повышающихся эксплуатационных требованиях важное значение имеет поиск новых способов изготовления таких деталей с целью повышения их качества и сокращения технологического цикла. Одним из эффективных и малоизученных процессов для изготовления цилиндрических деталей с фланцем является вытяжка с утонением стенки по внутреннему контуру.

Вытяжка с утонением стенки по внутреннему контуру – это процесс принудительного уменьшения толщины стенки в зазоре между матрицей и пуансоном за счет ее удлинения и раздачи под действием осевой растягивающей силы, приложенной к внутренней боковой поверхности втулочной части полуфабриката.

В литературе данный процесс обычно связывают с отбортовкой и называют отбортовкой с утонением стенки [1, 2] или комбинированной отбортовкой [3]. Такое наименование является не совсем удачным, поскольку связывает процесс с частным случаем изготовления исходной заготовки, однако технологические возможности процесса значительно шире. При помощи вытяжки с утонением стенки по внутреннему контуру можно изготавливать детали и полуфабрикаты как методами листовой, так и объемной штамповки в холодном или полугорячем состоянии. В качестве исходной заготовки, используют цилиндрические полые заготовки (сквозные или с дном) с фланцем расположенным, как правило, на открытом торце. Форма втулочной части деталей с торцовым фланцем, изготавливаемых вытяжкой с утонением стенки по внутреннему контуру может быть различной: с дном, со сквозной втулочной частью, с отверстием в дне, со ступенчатой наружной и (или) внутренней поверхностью.

Целью работы является создание новой научно обоснованной методики подхода к процессам формоизменения осесимметричных деталей на примере малоизученного процесса – вытяжки с утонением стенки по внутреннему контуру, а также теоретическое обоснование нового процесса.

Убедительным доказательством подобия нового процесса с общепринятой вытяжкой с утонением является способ взаимного преобразования или инверсии одного процесса вытяжки в другой. В геометрии термином *инверсия* называется преобразование одних фигур в другие путем «выворачивания» пространства через окружность ω .

На рис. 1 представлена схема инверсии геометрии рабочего инструмента и заготовки процесса вытяжки с утонением по наружному контуру в новый процесс – вытяжку с утонением стенки по внутреннему контуру. Более темным цветом на схеме обозначен очаг пластической деформации.

Впервые такой метод преобразования процессов обработки металлов давлением был предложен в работе [4] посвященной трансформации основных видов процесса осесимметричного выдавливания. Такая формулировка является не совсем корректной, поскольку термин *трансформация* может быть использован для описания любых геометрических преобразований и подразумевает изменение вида, формы, свойств процесса. С этой точки зрения термин *инверсия* предпочтительнее, поскольку более точно характеризует схему «выворачивания» пространства.

Методика инверсии заготовки в виде колпачка для вытяжки с утонением стенки по наружному контуру заключается в следующем. Образец в меридиональном сечении, мысленно рассекается вдоль оси симметрии, затем, поворачивая левую и правую часть на 180° ,

относительно оси z вокруг окружности инверсии ω , получаем заготовку с фланцем и сквозной втулочной частью (рис. 1). При этом дно колпачка становится фланцем, внутренняя поверхность втулочной части становится наружной, а наружная – внутренней. Окружность инверсии ω , расположена на срединной поверхности втулочной части детали и остается неизменной. Толщина стенки втулочной части сохраняется, а угол конусности на внутренней поверхности переносится на наружную и наоборот. Такое подобие сохраняется и при инверсии геометрии рабочего инструмента, т. е. пуансон вытяжки с утонением стенки по наружному контуру становится матрицей для вытяжки с утонением по внутреннему контуру, а матрица становится пуансоном (при этом $\alpha_n = \beta_m$; $\alpha_m = \beta_n$). Таким образом, после вытяжки с утонением стенки по внутреннему контуру, готовая деталь имеет небольшой угол конусности не на внутренней, а на наружной поверхности, за счет угла конусности на рабочей поверхности матрицы для снижения выталкивающих сил. Внутренняя же поверхность, которая, как правило, является наиболее ответственной при сборке, имеет цилиндрическую форму с минимальными отклонениями формы и размеров, что значительно облегчает надежное центрирование различных конструктивных элементов (валов, подшипников) во втулочную часть детали при сборке готового узла или изделия.

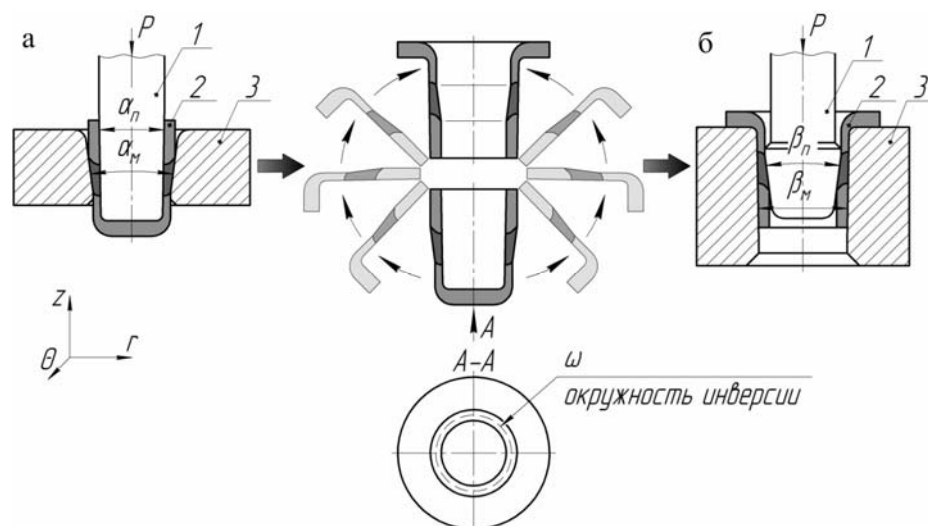


Рис. 1. Схема инверсии процесса вытяжки с утонением стенки по наружному контуру (а) в процесс вытяжки с утонением по внутреннему контуру (б):

1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица

Основные геометрические особенности инверсии процессов листовой штамповки сводятся к следующему:

- все точки окружности инверсии остаются на месте, все точки тела, находившиеся внутри окружности, попадают наружу, а все точки, располагавшиеся снаружи окружности – внутрь;
- для сохранения парного подобия процессов окружность инверсии необходимо располагать на срединной поверхности полой заготовки;
- в окружном сечении все точки исходной заготовки симметричны точкам инверсированной заготовки относительно окружности ω .

При помощи такого подхода возможно более точное описание и других процессов листовой штамповки, сохраняющие парное подобие в результате инверсии геометрии рабочего инструмента и заготовки (рис. 2).

Данные процессы достаточно подробно изучены, поэтому в результате анализа схем напряженного состояния в зоне очага пластической деформации парных процессов можно сделать вывод, что в результате инверсии сохраняются форма и размеры ОПД, а также характер течения металла. Осевой σ_z и радиальный σ_r компоненты напряжений не меняют своего знака, а окружной компонент σ_θ меняет знак на противоположный.

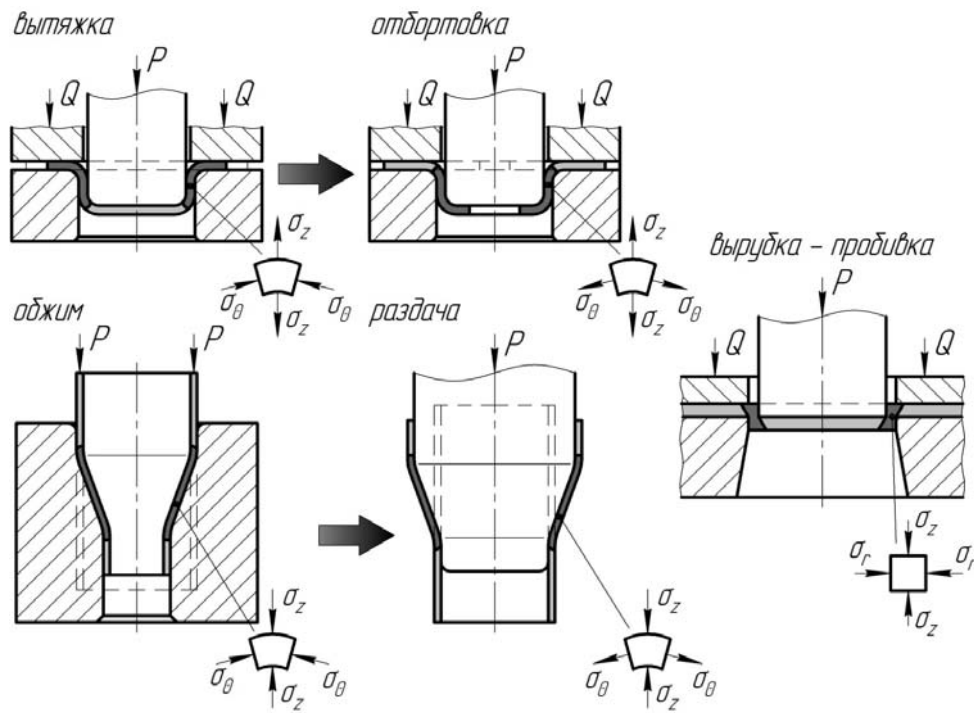


Рис. 2. Схемы процессов, сохраняющих парное подобие при инверсии геометрии рабочего инструмента и заготовки

Для проверки полученного утверждения и сравнительной оценки распределения параметров НДС при вытяжке с утонением стенки по внутреннему и по наружному контуру было проведено компьютерное моделирование процессов методом конечных элементов, по схемам, представленным на рис. 1. Для предотвращения складкообразования на фланце и затекания металла из фланца заготовки во втулочную часть, при моделировании вытяжки с утонением стенки по внутреннему контуру был использован прижим силой 30000 Н. Основные геометрические размеры исходных заготовок: высота заготовки $H_0 = 11$ мм; толщина дна (фланца при вытяжке с утонением по внутреннему контуру) s_0 (s_ϕ) = 2,5 мм; наружный диаметр втулочной части $D_0 = 14,4$ мм; диаметр фланца (при вытяжке с утонением стенки по внутреннему контуру) $D_\phi = 24,8$ мм. Коэффициент утонения стенки при деформировании по обеим схемам составил $k = s/s_0 = 1/2 = 0,5$. Угол конусности пуансона (матрицы) $\alpha_n = \beta_m = 2^\circ$; угол конусности матрицы (пуансона) $\alpha_m = \beta_n = 15^\circ$. Графики распределения компонентов деформации по высоте втулочной части представлены на рис. 3, а, б.

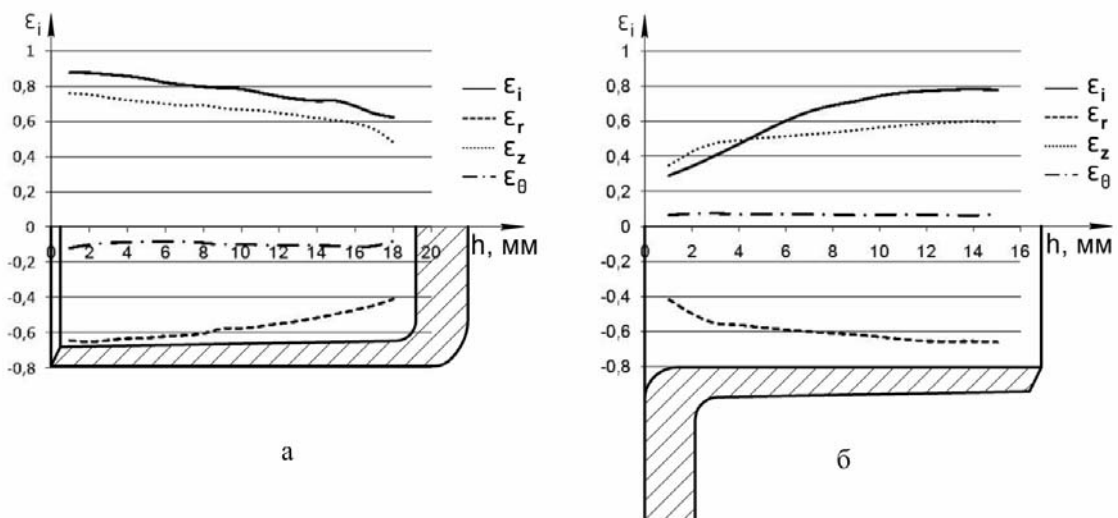


Рис. 3. Графики распределения компонентов деформации по высоте втулочной части при вытяжке с утонением стенки по наружной поверхности (а) и по внутренней поверхности (б)

Схема напряженного состояния элементарного объема в зоне очага интенсивной пластической деформации представлена на рис. 4. На схеме показаны силы нормального давления N_m , N_n и силы трения T_m , T_n , действующие на поверхностях контакта заготовки с матрицей и пуансоном.

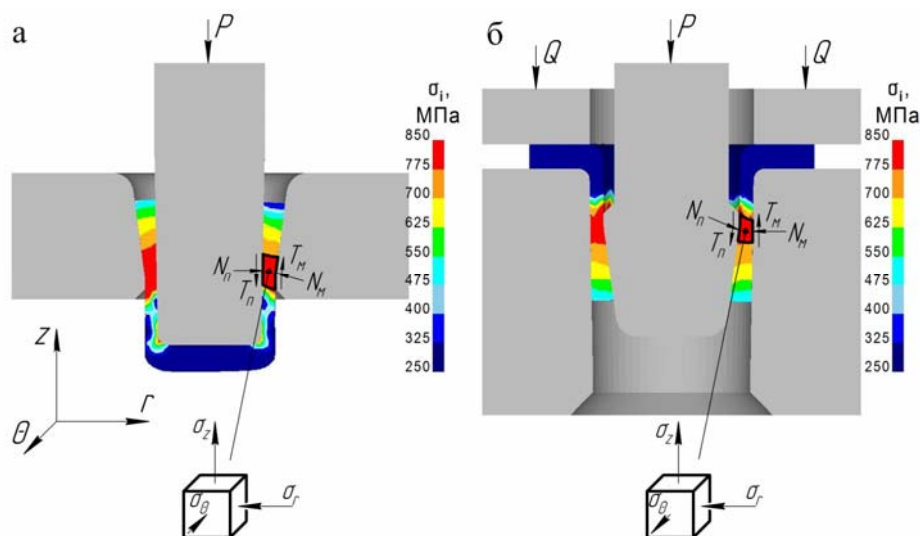


Рис. 4. Схема напряженного состояния элементарного объема в ОПД при вытяжке с утонением стенки по наружной поверхности (а) и по внутренней поверхности (б)

В результате анализа схем напряженного состояния в зоне ОПД и распределения компонентов деформации по высоте втулочной части в конечной стадии процесса установлено, что главным существенным отличием напряженно-деформированного состояния при вытяжке с утонением стенки по внутреннему контуру является появление растягивающего компонента напряжения и деформации удлинения в окружном направлении, т. е. процесс происходит с небольшой раздачей стенки заготовки, в отличие от обжатия при вытяжке с утонением по наружному контуру. Максимальные растягивающие напряжения $\sigma_z \max$ при этом возникают на внутренней поверхности заготовки, что обеспечивает высокое качество и чистоту поверхности внутренней полости детали. Распределение интенсивности деформации по толщине стенки в продольном сечении заготовки неоднородно. Интенсивность деформации максимальна на внутренней поверхности и минимальна – на наружной (рис. 5), за счет чего происходит упрочнение внутреннего поверхностного слоя на 30–40 % по сравнению с твердостью исходной заготовки [2].

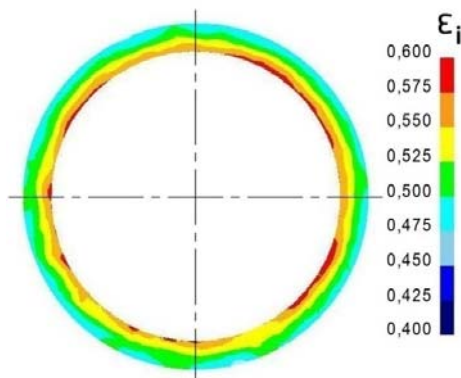


Рис. 5. Неравномерность распределения интенсивности деформации в поперечном сечении заготовки после вытяжки с утонением стенки по внутреннему контуру

Для повышения допустимой величины деформации и уменьшения разностенности готовой детали вытяжку с утонением стенки по внутреннему контуру, по аналогии с общепринятой

вытяжкой с утонением через несколько «плавающих» твердосплавных матриц, можно проводить составным пуансоном, представляющим собой стержень с «плавающими» роликами, постепенно увеличивающими диаметр полости. К преимуществам составного пуансона относят:

- снижение разностенности готового изделия за счет самоцентрирования заготовки при деформации «плавающими» роликами составного пуансона;
- уменьшение стоимости инструмента – твердосплавными необходимо изготавливать только ролики, а не весь пуансон;
- быстрая замена роликов и возможность переналаживания штампа для изготовления изделий других номенклатур.

Твердосплавные (сплавы ВК6, ВК8 и др.) ролики повышают износостойкость инструмента и предотвращают налипание материала заготовки на инструмент.

На основании проведенного теоретического исследования процесса построена расчетная схема процесса вытяжки с утонением по внутреннему контуру составным пуансоном с «плавающим» роликом, представленная на рис. 6.

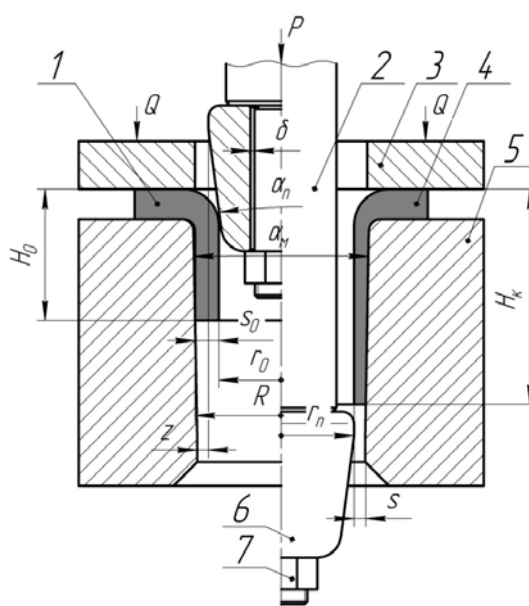


Рис. 6. Расчетная схема вытяжки с утонением стенки по внутреннему контуру:

1 – заготовка; 2 – стержень; 3 – прижим; 4 – полуфабрикат; 5 – матрица; 6 – ролик; 7 – стопорная гайка

Зазор δ между стержнем и «плавающими» роликами выбирается в пределах 0,05...0,20 мм на сторону, в зависимости от габаритов детали.

При сквозной вытяжке с утонением стенки по внутреннему контуру высота готовой детали H_k может быть приближенно определена по формуле:

$$H_k = \frac{(R^2 - r_0^2)H_0}{R^2 - r_n^2}, \quad (1)$$

где H_0 – высота заготовки; R – радиус наружной поверхности втулочной части исходной заготовки; r_0 – радиус внутренней поверхности втулочной части исходной заготовки; r_n – радиус пуансона.

Данная формула экспериментально проверена в работе [5], однако в ней не учтено влияние угла конусности рабочей поверхности матрицы при вытяжке глубоких деталей.

Вследствие подобия схем напряженно-деформированного состояния в процессах вытяжки с утонением по наружной и внутренней поверхности величина максимальных растягивающих напряжений $\sigma_{z \max}$ и технологической силы P может быть определена по методике, предложенной Поповым Е. А. [6]:

$$\sigma_{z \max} = \frac{\sigma_{\theta}}{1 - \psi_{\text{ш}}} \left(\frac{1 - k}{2\psi_{\text{ш}}} \right)^{\frac{\psi_{\text{ш}}}{1 - \psi_{\text{ш}}}} \cdot \left[\left(1 - \frac{\mu}{\alpha_n} + \frac{\mu}{\alpha_n} \ln \frac{1}{k} \right) \ln \frac{1}{k} + \text{tg} \frac{\alpha_n}{2} \right]; \quad (2)$$

$$P = \pi(d_n + s)s \left\{ \sigma_{z \max} + \frac{\sigma_{\theta}}{1 - \psi_{\text{ш}}} \left(\frac{1 - k}{2\psi_{\text{ш}}} \right)^{\frac{\psi_{\text{ш}}}{1 - \psi_{\text{ш}}}} \mu \text{ctg} \alpha_n \left[\ln \frac{1}{k} - \frac{s_0^2 - s^2}{2s(R_M + r_n)} \right] \right\}, \quad (3)$$

где σ_{θ} – предел прочности материала заготовки; $\psi_{\text{ш}}$ – равномерное сужение площади поперечного сечения стандартного образца при испытании на растяжение; μ – коэффициент трения (для холодной штамповки $\mu = 0,10 \dots 0,15$); $k = s/s_0$ – коэффициент утонения стенки.

В формуле (2) принято допущение, что коэффициенты трения по пуансону и матрице равны друг другу.

Предложенные формулы можно применять для приближенного расчета максимальных растягивающих напряжений $\sigma_{z \max}$ в заготовке и технологической силы P при вытяжке с утонением стенки по внутреннему контуру, однако для точных расчетов необходимо учитывать влияние небольших растягивающих напряжений σ_{θ} в окружном направлении заготовки.

Таким образом, вытяжка с утонением стенки по внутренней поверхности является самостоятельной высокоэффективной операцией, пригодной для изготовления деталей с фланцем с высоким качеством внутренней поверхности и высокой точностью размеров втулочной части.

ВЫВОДЫ

Предложен новый подход к исследованию процессов обработки металлов давлением за счет инверсии («выворачивания») пространства. Произведен краткий анализ напряженно-деформированного состояния процессов вытяжки с утонением стенки по наружному и внутреннему контуру, на основании которого дано теоретическое обоснование нового процесса как процесса вытяжки. Предложены расчетные зависимости для определения основных технологических параметров процесса вытяжки с утонением стенки, с пригодной для практики степенью точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Аверкиев Ю. А. Отбортовка с утонением стенки / Ю. А. Аверкиев, Б. В. Башков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1976. – № 9. – С. 21–22.
3. Ковалев В. Г. О точности при комбинированной отбортовке / В. Г. Ковалев, В. М. Соловьев // Вестник машиностроения. – 1994. – № 9. – С. 39–41.
4. Гуменюк Ю. И. Трансформация основных видов процесса осесимметричного выдавливания / Ю. И. Гуменюк // Металлообработка. – 2001. – № 5. – С. 45–47.
5. Воронцов Л. А. Теоретическое и экспериментальное исследование вытяжки по внутренней поверхности / Л. А. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2006. – № 7. – С. 37–43.
6. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

Гуменюк Ю. И. – д-р техн. наук, проф. БГТУ «Военмех»;

Лобов В. А. – аспирант БГТУ «Военмех».

БГТУ «Военмех» – Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: bgtu_omd@mail.ru