

УДК 621.73

А. Л. Воронцов, В. П. Ступников,
В. К. Стратьев, Н. А. Балахонцева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫТЯЖКИ ПО ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЛИ РЕНОВАЦИИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА СТУПЕНЧАТЫХ ВТУЛОК

Разработана теория вытяжки по внутренней поверхности полой заготовки. Получены расчетные формулы, необходимые для проектирования технологического процесса такой вытяжки, обеспечивающего ее эффективное применение. Высокая точность и надежность расчетных формул подтверждены сопоставлением с экспериментальными данными.

E-mail: mt13@bmstu.ru

Ключевые слова: *вытяжка, внутренняя поверхность полой заготовки, ступенчатая втулка, оптимальные углы конусности пуансона, напряжения.*

Поскольку настоящая работа имеет не только научно-прикладное, но и учебно-методическое значение, авторы решили дать некоторые уточнения и новые определения научных терминов, относящихся к рассматриваемому процессу.

Вытяжкой по внутренней поверхности называется операция принудительного уменьшения толщины стенки полой заготовки в зазоре между матрицей и пуансоном путем приложения последним к поверхности отверстия растягивающей силы (рис. 1).

Эта операция является малоизвестной и даже не входит в фундаментальную классификацию операций малоотходной объемной штамповки [1]. Как правило, такую вытяжку считают частным случаем отбортовки, т.е. относят к листовой штамповке и называют *отбортовкой с утонением стенки* [2, 3] или *комбинированной отбортовкой* [4]. Такие названия представляются не вполне удачными, поскольку они неразрывно связывают рассматриваемую операцию с частным вариантом получения исходной заготовки и сужают представление о возможном применении данной операции.

Между тем вытяжка по внутренней поверхности является высокоэффективной операцией, которую можно применять и при получении исходных заготовок методами объемной штамповки и которая позволяет при объемной штамповке получать разнообразные изделия при

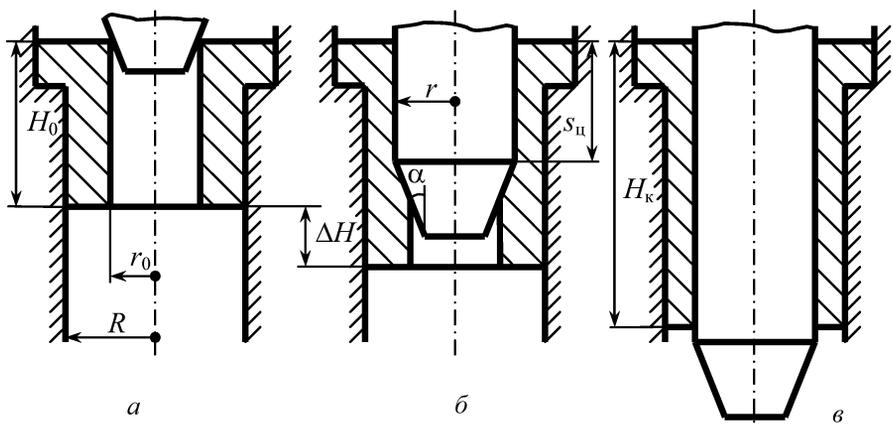


Рис. 1. Варианты вытяжки по внутренней поверхности

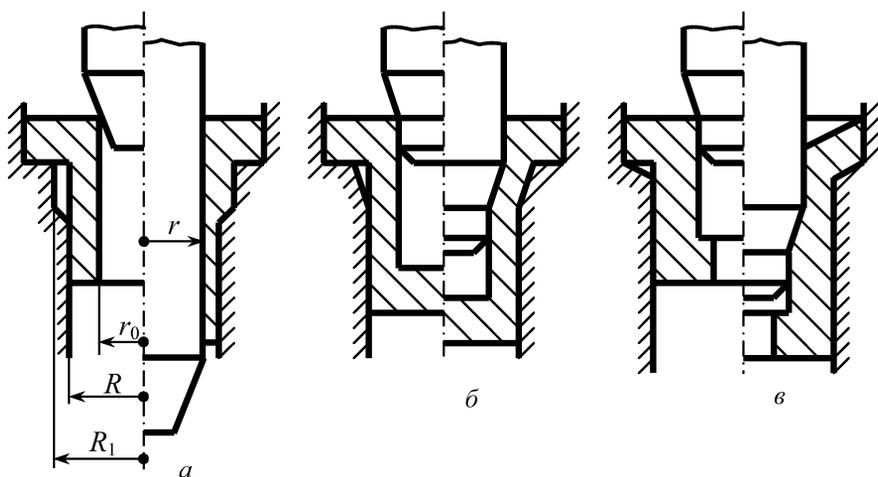


Рис. 2. Варианты применения вытяжки по внутренней поверхности

сравнительно малых удельных силах деформирования (рис. 2). Это и побудило авторов дать новое название и определение этой операции, согласованное с определением вытяжки с утонением стенки, данным в работе [5].

Следует отметить, что, по мнению авторов, традиционное отнесение операций вытяжки с утонением стенки (т.е. вытяжки по наружной поверхности) и вытяжки по внутренней поверхности к листовой штамповке является не вполне правомерным. Типичными операциями листовой штамповки являются лишь операции, в которых толщина листа изменяется в процессе деформации *самопроизвольно*, т.е. как возможная реакция металла на процесс силового воздействия. Примерами являются изменение толщины фланца в процессе обычной вытяжки, локальное изменение толщины листа при гибке листовых заготовок,

вырубке или пробивке, утолщение края листового стакана в процессе его обжима, утонение аналогичного края при отбортовке, изменение толщины в процессе раздачи и др. Фактическим результатом всех этих процессов является то, что окончательные изменения толщины листа в тех или иных местах и направлениях происходят самопроизвольно и размерами штампового инструмента не гарантируются.

Для теоретического анализа таких операций используются обычные упрощения из теории оболочек, пластин или же упрощенные уравнения инженерного метода тонких сечений, заменяющего бесконечно малые элементы сплошной среды на условные элементы, конечные в том или ином направлении. Соответственно в традиционных математических исследованиях операций листовой штамповки используются упрощенные обыкновенные дифференциальные уравнения, а не классические системы уравнений механики деформируемого твердого тела в частных производных.

Но в процессе вытяжек с утонением стенки как по наружной, так и по внутренней поверхности происходит не только изменение размеров или формы (с учетом возможности получения конических или иных переходов) в продольном направлении, но и гарантированное принудительное изменение размеров и формы по толщине листа, определяемое геометрическими параметрами штампового инструмента. Кроме того, заготовки под данные операции можно получать не только с помощью листовой штамповки, но в большинстве случаев эффективнее применение операций высадки и выдавливания (а иногда литья или резания), позволяющих обеспечить намного более разнообразное сочетание геометрических форм и толщин.

Таким образом, операции вытяжки с утонением стенки по наружной или внутренней поверхности по своей сути являются операциями не листовой, а объемной штамповки и требуют соответствующих методов теоретического исследования, которые и будут применены далее. Показательно, что Е.А. Попов для анализа вытяжки с утонением стенки [2] использовал не ту теорию оболочек, которую применяют для других операций листовой штамповки, а чужеродный для данной области метод баланса работ, обычно используемый для исследования процессовковки, объемной штамповки и прессования.

Укажем, что с помощью вытяжки по внутренней поверхности можно получать различный рельеф не только на внутренней, но и на наружной поверхности (рис. 2, *а*, *б*). При этом необходимым условием для заполнения полости матрицы, образующей наружный рельеф, является соотношение

$$r > \sqrt{R_1^2 - R^2 + r_0^2} \quad (1)$$

или

$$R_1 < \sqrt{R^2 + r^2 - r_0^2}, \quad (2)$$

где R_1 — наибольший радиус заполняемого наружного рельефа.

Следует помнить, что выражения (1) и (2) не являются достаточными условиями, гарантирующими заполнение рельефа на наружной поверхности, поскольку течение металла возможно не только в радиальном, но и в осевом направлении.

Вытяжка по внутренней поверхности может быть сквозной или частичной (см. рис. 1, *в* и *б*).

При сквозной вытяжке высота изделия определяется по формуле

$$H_k = \frac{(R^2 - r_0^2)H_0}{R^2 - r^2}. \quad (3)$$

Частичная вытяжка позволяет получить изделие со ступенчатой внутренней поверхностью. В этом случае приращение высоты изделия (см. рис. 1, *б*) определяется по формуле

$$\Delta H = \frac{3(r^2 - r_0^2)s_{ц} + (r - r_0)(r^2 + rr_0 - 2r_0^2) \operatorname{ctg} \alpha}{3(R^2 - r_0^2)}, \quad (4)$$

где $s_{ц}$ — глубина внедрения цилиндрической части пуансона.

Частичная вытяжка в ряде случаев позволяет заменить операцию выдавливания ступенчатым пуансоном (см. рис. 2, *б*, *в*), требующую создания больших удельных сил и приводящую, как правило, к низкой стойкости пуансона [6]. При частичной вытяжке для предотвращения образования внутреннего наплыва в нижней части очага пластической деформации заходную часть пуансона лучше делать не конической (см. рис. 2, *б*), а с небольшим цилиндрическим участком, выполняющим функцию оправки (см. рис. 2, *б*, *в*).

Следует отметить, если матрица препятствует расширению фланца (см. рис. 1), то на начальном этапе вытяжки в зоне фланца сила деформирования будет существенно больше силы, необходимой для последующего этапа вытяжки в зоне втулочной части. Верхнюю оценку силы на этапе вытяжки в зоне фланца можно сделать по формулам, приведенным в разделе 8.6 монографии [5]. Для уменьшения силы на данном этапе можно проводить вытяжку без ограничения диаметрального расширения фланца (рис. 3). В этом случае необходимую силу можно определить по формулам из раздела 16.6 книги [7]. Уменьшению силы на этапе вытяжки в зоне фланца способствует и наличие различных заполняемых полостей (см. рис. 2).

В зависимости от имеющегося кузнечно-прессового оборудования и типоразмеров получаемого изделия (например, изделие со сквозным отверстием (см. рис. 1, *в*) или стакан (см. рис. 2, *б*)) исходную заготовку

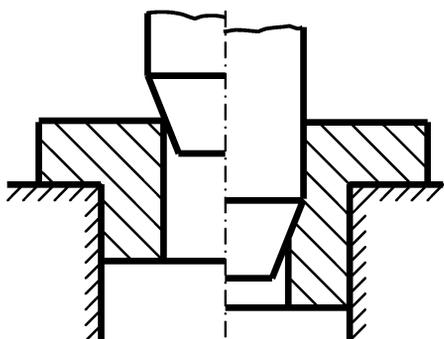


Рис. 3. Вытяжка по внутренней поверхности без ограничения диаметра фланца

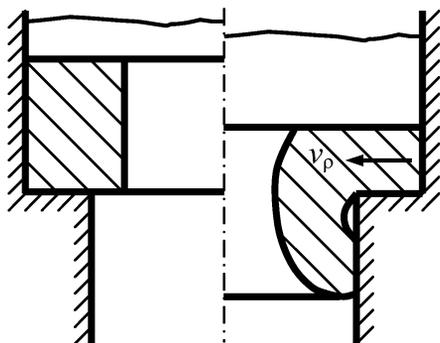


Рис. 4. Получение заготовки для вытяжки прямым выдавливанием без оправки

для вытяжки можно получать различными способами: высадкой, контурной осадкой, радиальным выдавливанием, прямым выдавливанием на оправке. Для уменьшения силы деформирования можно использовать и прямое выдавливание без оправки (рис. 4), вариант которого с использованием заготовки в виде тора рассмотрен в работе [8]. Верхнюю оценку силы такого выдавливания можно сделать по формуле, приведенной в разделе 8.1 монографии [6]. Отметим, что из-за сдерживающего влияния выдавленной втулочной части, противодействующего радиальному течению металла из фланца (см. рис. 4), на боковой наружной поверхности заготовки образуется поднутрение, которое, как правило, устраняется при последующей вытяжке по внутренней поверхности.

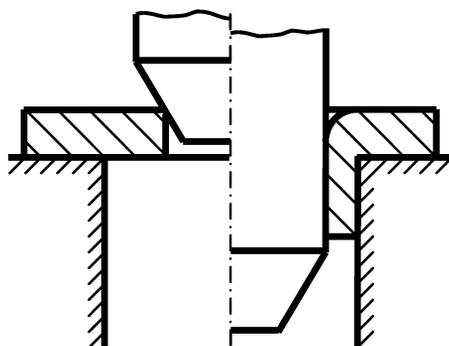


Рис. 5. Совмещение вытяжки по внутренней поверхности с отбортовкой

Иногда требуемое изделие можно получить, традиционно совмещая вытяжку по внутренней поверхности с отбортовкой (рис. 5). Следует иметь в виду, что при таком способе в зоне перехода фланца в отверстие образуется заметная воронка. Она, как правило, образуется и при получении исходной заготовки с помощью способа, показанного на рис. 4. При других способах реализации вытяжки по внутренней поверхности (см. рис. 1–3) скругление зоны перехода существенно уменьшается.

В основе известных теоретических исследований вытяжки по внутренней поверхности [8, 9] лежит решение Е.А. Попова, полученное методом баланса работ для обычной вытяжки с утонением стенки [2].

Недостатки этого решения подробно рассмотрены в разделе 12.7 монографии [5].

Для нового решения используем соотношения наиболее общей на современном уровне теории пластического течения.

Расчетная схема вытяжки по внутренней поверхности показана на рис. 6. Очаг пластической деформации сосредоточен в зоне **1**, ниже которой расположена исходная часть заготовки **2**, а выше — протяннутая часть заготовки **3**.

Принимаем следующие допущения: материал считаем жесткопластическим, а упрочнение учитываем средним по очагу пластической деформации значением напряжения текучести σ_s ; силы контактного трения определяем по закону Зибеля как $\tau_k = \mu\beta\sigma_s$, где μ — коэффициент трения по напряжению текучести, а β — коэффициент Лоде. При этом используем относительные напряжения, отнесенные к среднему напряжению текучести σ_s .

Рассмотрим зону **1**. При расчете пластического течения в аналогичной зоне (см. раздел 6.3 работы [5]) математически обосновано, что при обычно применяемых на практике углах $\alpha \leq 20^\circ$ скорость тангенциальной деформации $\xi_\theta \approx 0$, т.е. рассматриваемую задачу можно считать плоской. Поэтому при решении используем полярные координаты ρ и φ .

Напряженное состояние в зоне **1** определяется выражениями (см. раздел 6.3 работы [5]),

$$\begin{aligned}\sigma_\rho &= \beta + (C - \beta) \ln \rho + C_2; \\ \sigma_\varphi &= (C - \beta) \ln \rho + C_2; \\ \tau_{\varphi\rho} &= -C\varphi + C_1,\end{aligned}\tag{5}$$

где C , C_1 , C_2 — произвольные постоянные интегрирования.

Эпюру скорости перемещения деформируемого металла v_ρ по поверхности матрицы с достаточной для практики точностью можно считать линейной (см. рис. 6, слева). Тогда в соответствии с доказательством из раздела 14.3 книги [7] следует принять, что сила контактного трения по матрице определяется не коэффициентом трения μ , а его половиной. С учетом этого произвольные постоянные C и C_1 находятся из граничных условий: $\tau_{\varphi\rho} = 0,5\beta\mu$ при $\varphi = 0$ и $\tau_{\varphi\rho} = \beta\mu_1$ при $\varphi = \alpha$, откуда

$$C = \beta(0,5\mu - \mu_1)/\alpha, \quad C_1 = 0,5\beta\mu,\tag{6}$$

где μ_1 — коэффициент трения по пуансону.

Вследствие изменения направления скорости движения материала в зоне **2** по отношению к v_ρ в зоне **1** на границе между ними возникает разрыв в касательных составляющих скоростей, приводящий к резкой локализации сдвиговых деформаций и, соответственно, к появлению

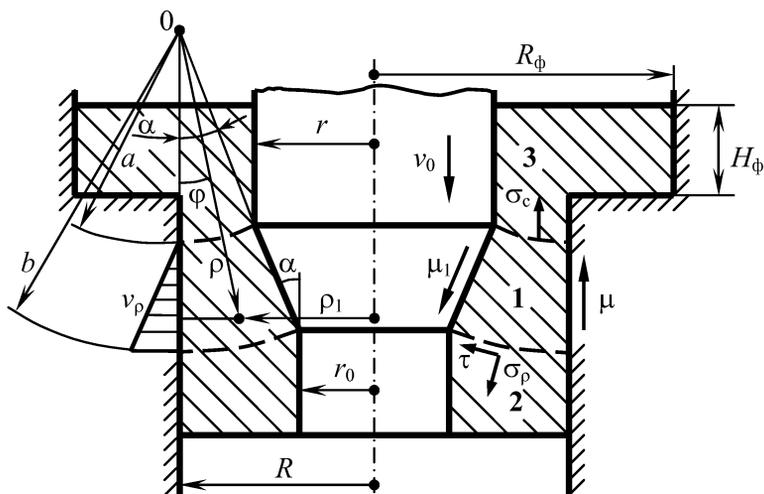


Рис. 6. Расчетная схема вытяжки по внутренней поверхности

предельных касательных напряжений $\tau = 0,5\beta$. Аналогичные условия имеют место и на границе между зонами 1 и 3. С учетом этого произвольную постоянную C_2 определяем из следующего граничного условия:

$$\pi(R^2 - r_0^2) \sigma_\rho|_{\rho=b} - P_\tau|_{\rho=b} = 0. \quad (7)$$

Первое выражение этого уравнения написано с учетом известной теоремы [10] об определении силы в зависимости от напряжения, переменного по направлению, но постоянного по величине.

Сила от действия касательных напряжений $\tau = 0,5\beta$ равна

$$P_\tau|_{\rho=b} = 2\pi \int_{r_0}^R \tau \sin \varphi \rho_1 d\rho_1 = 2\pi \int_0^\alpha \tau \sin \varphi (R - b \sin \varphi) b d\varphi = \\ = \pi\beta b \left[R(1 - \cos \alpha) - \frac{b}{4}(2\alpha - \sin 2\alpha) \right]. \quad (8)$$

Для облегчения практических расчетов радианное значение угла α в выражениях (6) и (8) в силу малости заменим на $\sin \alpha$. В результате получаем

$$P_\tau|_{\rho=b} = \pi\beta b(1 - \cos \alpha)(R - 0,5b \sin \alpha). \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в уравнение (7), найдем произвольную постоянную

$$C_2 = -\beta - (C - \beta) \ln b + \frac{\beta b(1 - \cos \alpha)(R - 0,5b \sin \alpha)}{R^2 - r_0^2}. \quad (10)$$

Напряжение в протянутой части стенки определяем из следующего выражения:

$$\sigma_c = \sigma_\rho|_{\rho=a} + \frac{P_\tau|_{\rho=a}}{\pi(R^2 - r^2)}. \quad (11)$$

Аналогично выражению (9) можно получить, что

$$P_\tau|_{\rho=a} = \pi\beta a(1 - \cos \alpha)(R - 0,5a \sin \alpha). \quad (12)$$

Подставив выражения (5), (6), (10), (12) в равенство (11) и учитывая, что при плоской деформации $\beta = 1,155$, а из геометрических соотношений

$$b = \frac{R - r_0}{\sin \alpha}, \quad a = \frac{R - r}{\sin \alpha}, \quad (13)$$

окончательно получим

$$\sigma_c = 1,155 \left[\left(1 + \frac{\mu_1 - 0,5\mu}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R - r_0}{R - r} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right]. \quad (14)$$

Поскольку угол матрицы α при вытяжке по внутренней поверхности невелик, то деформированное состояние заготовки является стационарным и достаточно равномерным в поперечном направлении. Поэтому можно определять среднее по очагу пластической деформации напряжение текучести по формуле

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{s0} + \sigma_{sk}}{2}, \quad (15)$$

в которой конечное напряжение текучести σ_{sk} определяется по значению накопленной деформации протянутой части стенки:

$$e_i = 1,155 \ln \frac{R^2 - r_0^2}{R^2 - r^2}. \quad (16)$$

Полная сила вытяжки по внутренней поверхности будет равна:

$$\begin{aligned} P &= \sigma_s \pi (R^2 - r^2) \sigma_c = \\ &= 3,63 \sigma_s (R^2 - r^2) \left[\left(1 + \frac{\mu_1 - 0,5\mu}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R - r_0}{R - r} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

По выражению (17) из условия $\partial P / \partial \alpha = 0$ можно найти оптимальный угол конусности пуансона, при котором сила вытяжки будет минимальной:

$$\cos \alpha_P = \frac{1}{1 + (\mu_1 - 0,5\mu) \ln \frac{R - r_0}{R - r}}. \quad (18)$$

Из сравнения выражений (14) и (17) видно, что в отличие от вытяжки с утонением стенки при вытяжке по внутренней поверхности найденный оптимальный угол равен оптимальному углу, при котором

растягивающее напряжение в стенке протянутой части заготовки имеет минимальное значение, что, соответственно, позволяет получить наибольшую деформацию стенки за один переход.

Таблица 1

Изменение оптимальных углов конусности пуансона при вытяжке по внутренней поверхности ($R = 40$ мм, $r_0 = 30$ мм)

r , мм		31	32	33	34	35
e_i		0,105	0,225	0,363	0,526	0,721
α_P	$\mu = \mu_1 = 0,1$	6°	8,5°	11°	13°	15°
	$\mu = \mu_1 = 0,3$	10°	14,5°	18°	22°	25°

Вычисленные значения оптимальных углов (см. табл. 1) хорошо согласуются с данными работ [3, 9].

Из табл. 1 видно, что *при вытяжке по внутренней поверхности с увеличением степени деформации и коэффициентов трения значение оптимального угла конусности пуансона также увеличивается.*

Поскольку для нормального протекания процесса вытяжки нельзя допускать в протянутой части стенки заготовки появления пластических деформаций, приводящих к ее разрыву, то деформацию за один переход следует ограничивать, руководствуясь условием

$$\sigma_c \leq \frac{\sigma_{ск}}{\sigma_s}. \quad (19)$$

При вытяжке по внутренней поверхности возможен также срез фланца. Обычно для расчета силы среза используют не предел текучести, а предел прочности, но даже и в этом случае эксперименты показывают, что реальная сила, необходимая для среза, превышает теоретическую [2]. С учетом этого для определения предельного значения касательного напряжения вместо предела текучести σ_{s0} используем среднее напряжение текучести σ_s , в результате чего условие отсутствия среза будет иметь вид (см. рис. 6)

$$2\pi R H_\Phi \frac{\sigma_s}{2} > P.$$

Отсюда следует, что высота фланца должна удовлетворять соотношению

$$H_\Phi > \frac{P}{\pi R \sigma_s}. \quad (20)$$

С учетом плоской деформации относительное гидростатическое давление определяется выражением

$$\sigma = \sigma_\theta = \frac{\sigma_\varphi + \sigma_\rho}{2},$$

подставив в которое формулы (5), (6), (10) и (13) при $\rho = a$, где накопленная деформация будет наибольшей, получим:

$$\sigma = 0,577 \left[2 \left(1 + \frac{\mu - 0,5\mu_1}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R - r_0}{r - r_0} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} - 1 \right]. \quad (21)$$

На основе выражений (16) и (21) по методике, приведенной в разделе 12.7 монографии [5], можно прогнозировать трещинообразование при вытяжке по внутренней поверхности.

Для проверки точности полученных расчетных выражений как при наличии, так и при отсутствии упрочнения, была выполнена серия экспериментов по холодной вытяжке заготовок из свинца С00 и алюминиевого сплава АВ. Резанием получали исходные заготовки со следующими размерами (см. рис. 1, 6): $R = 20$ мм, $H_0 = 30$ мм, $H_\phi = 10$ мм, $R_\phi = 25$ мм. Вытяжку осуществляли по схеме, приведенной на рис. 3, пуансоном с радиусом калибрующей цилиндрической части $r = 15$ мм и углом конусности $\alpha = 15^\circ$. Исходные радиусы отверстий заготовок r_0 варьировались. Часть свинцовых заготовок смазывалась смазкой ЦИАТИМ, другая часть — обезжиривалась. Все алюминиевые заготовки смазывались животным жиром. Типовые заготовки, полученные после вытяжки со смазкой, показаны на рис. 7. В процессе экспериментов фиксировались максимальные силы на этапе вытяжки втулочной части заготовки. Расчетные и экспериментальные данные приведены в табл. 2, 3.

Пример. Смазанная животным жиром заготовка из алюминиевого сплава АВ с исходными размерами $R = 20$ мм, $r_0 = 10$ мм, $H_\phi = 10$ мм была подвергнута холодной вытяжке по внутренней поверхности пуансоном с $r = 15$ мм и $\alpha = 15^\circ$. Требуется проверить вероятность разрушения заготовки и сравнить расчетное значение силы вытяжки с экспериментальным $P_s = 119$ кН.

Решение. С учетом хорошего смазочного материала принимаем $\mu = \mu_1 = 0,1$ и по формуле (14) находим относительное напряжение в протянутой части стенки заготовки: $\sigma_c = 1,107$. Затем по выражению

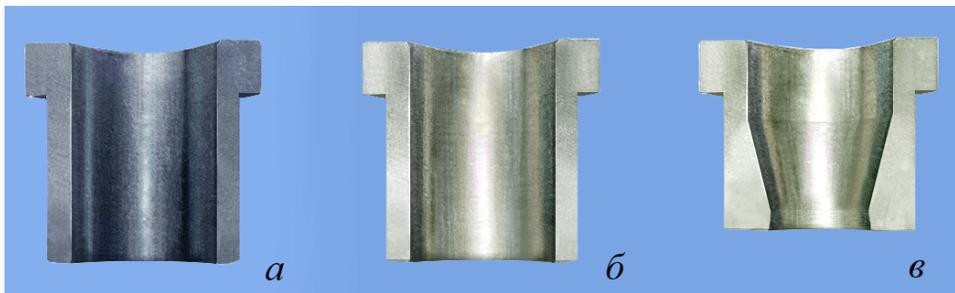


Рис. 7. Заготовки после вытяжки по внутренней поверхности:

a — сквозная вытяжка заготовки из свинца С00 с $r_0 = 12$ мм; *б* — сквозная вытяжка заготовки из алюминиевого сплава АВ с $r_0 = 12$ мм; *в* — частичная вытяжка заготовки из алюминиевого сплава АВ с $r_0 = 10$ мм

Сравнение расчетных и экспериментальных значений силы вытяжки по внутренней поверхности заготовок из свинца С00 ($R = 20$ мм, $r = 15$ мм, $\alpha = 15^\circ$, $\sigma_s = 20$ МПа)

r_0 , мм	$\mu = \mu_1$	σ_c	P , кН	P_3 , кН	δ , %
12	0,1	0,800	8,80	8,5	3,4
13	0,1	0,616	6,77	6,5	4,0
14	0,1	0,403	4,44	4,2	5,3
12	0,3	1,010	11,10	11,5	3,6
13	0,3	0,766	8,43	8,0	5,0
14	0,3	0,485	5,33	5,1	4,3

Таблица 3

Сравнение расчетных и экспериментальных значений силы вытяжки по внутренней поверхности заготовок из алюминиевого сплава АВ ($\mu = \mu_1 = 0, 1$, $R = 20$ мм, $r = 15$ мм, $\alpha = 15^\circ$)

r_0 , мм	σ_c	e_i	σ_{sk} , МПа	σ_s , МПа	P , кН	P_3 , кН	δ , %
10	1,107	0,623	262	201	122,27	119	2,7
12	0,800	0,439	244	192	84,45	81	4,1
13	0,616	0,321	231	185	62,76	60	4,4
14	0,403	0,177	211	176	38,94	37	5,0

(16) вычисляем накопленную деформацию $e_i = 0,623$. По аппроксимации кривой упрочнения алюминиевого сплава АВ [5]

$$\sigma_s = 349 - 163e^{-e_i} - 46e^{-20e_i} \text{ МПа}$$

находим $\sigma_{sk} = 262$ МПа. При $e_i = 0$ получаем $\sigma_{s0} = 140$ МПа и по формуле (15) находим среднее напряжение текучести $\sigma_s = 201$ МПа. Вычисляем отношение $\sigma_{sk}/\sigma_s = 1,303$ и, учитывая выполнение условия (19), делаем вывод, что разрыва стенки в процессе вытяжки не произойдет. По формуле (17) находим силу вытяжки $P = 122,27$ кН. Сравнивая с экспериментальным значением, определяем расхождение: $\delta = 2,7\%$. Далее находим, что правая часть неравенства (20) равна 9,7 мм. Поскольку это значение меньше $H_\phi = 10$ мм, делаем вывод, что отрыва фланца также не произойдет.

Из заготовок, выполненных из алюминиевого сплава АВ и смазанных животным жиром, в соответствии со схемами на рис. 2 были получены опытные изделия (рис. 8). Опытная штамповка подтвердила высокую эффективность вытяжки по внутренней поверхности.

Применительно к реновации был проделан следующий опыт. Точением из стали 15Х была получена ступенчатая втулка, форма которой показана на рис. 9. Допустим, что ответственными поверхностями втулки являются боковые наружные поверхности, которые изнашивались

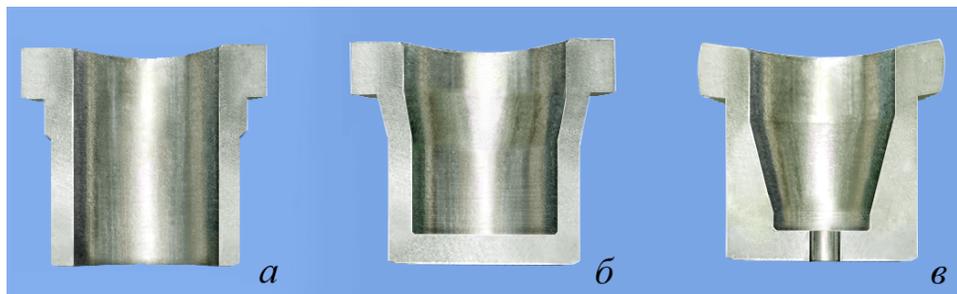


Рис. 8. Заготовки из алюминиевого сплава АВ, полученные вытяжкой по внутренней поверхности в соответствии со схемами на рис. 2



Рис. 9. Заготовка из стали 15Х после вытяжки по внутренней поверхности

в процессе эксплуатации. Диаметр отверстия втулки по условиям эксплуатации допускает увеличение на 0,6 мм. Это позволяет, расширив отверстие, увеличить диаметры наружных поверхностей, либо сразу получив требуемые параметры геометрии и качества поверхности, либо получив возможность довести их до требуемых с помощью точения или шлифования. Применению для расширения процесса дорнования препятствуют тонкостенные выступы на верхнем и нижнем фланцах втулки, которые могут быть смяты или могут потерять устойчивость, поскольку

процесс дорнования характеризуется сжатием детали в осевом направлении. В то же время вытяжка по внутреннему диаметру характеризуется растяжением стенки детали без упора в тонкостенные выступы, т.е. полностью исключает опасность их смятия или потери устойчивости. Пробная вытяжка позволила получить качественное изделие, показанное на рис. 9. Заготовка из стали 15Х с $r_0 = 14,7$ мм, $H_{\Phi} = 11$ мм была подвергнута холодной вытяжке по внутренней поверхности пуансоном с $r = 15$ мм и $\alpha = 15^\circ$. Радиальный зазор между поверхностями матрицы и наружными поверхностями втулки составлял 0,2 мм. Заготовка смазывалась смесью ЦИАТИМ и дисульфида молибдена. В результате вытяжки радиальный размер наиболее длинного участка боковой поверхности был увеличен с $R = 20$ мм до $R_1 = 20,15$ мм. По формуле (16) накопленная деформация $e_i = 0,057$. В соответствии с кривой упрочнения стали 15Х [5, с. 594, рис. 9.17] $\sigma_{s0} = 380$ МПа, $\sigma_{ск} = 460$ МПа, т.е. по формуле (15) $\sigma_s = 420$ МПа. С учетом этого при $\mu = \mu_1 = 0,1$ по формуле (17) получаем $P = 53,68$ кН, что отличается

от экспериментального значения $P_3 = 48$ кН (соответствующего этапу деформации наиболее протяженной ступени втулки с исходным радиусом 20 мм) на $\delta = 10,6\%$. Это можно объяснить тем, что в данном опыте помимо продольного течения имелось значительное перемещение металла в радиальном направлении, т.е. была лишняя степень свободы, что, как известно, заметно снижает необходимую силу деформирования [5, с. 567].

Во избежание смятия нижнего выступа для извлечения отштампованной втулки использовался трубчатый выталкиватель, действующий на более широкую периферийную часть нижнего торца втулки. Качество внутренней поверхности втулки после вытяжки соответствовало получаемому в результате чистового шлифования с применением СОЖ. Улучшение механических характеристик в результате упрочнения (предел текучести увеличился с $\sigma_{s0} = 380$ МПа до $\sigma_{sk} = 460$ МПа, т.е. в 1,21 раза или на 21 %) позволяет прогнозировать существенное увеличение износостойкости и срока службы такого изделия. Согласно известным исследованиям усталостной прочности [11, с. 88] увеличение перепада предела текучести детали и рабочего напряжения на 10 % позволяет увеличить долговечность работы без разрушения почти в 1,5 раза. Кроме того, высококачественная механическая обработка глубоких отверстий является достаточно трудоемкой операцией, значительно уступающей по производительности операции вытяжки (по данным Костромского экскаваторного завода замена операции расточки на вытяжку при производстве втулки звена гусеницы экскаватора ЭО 5115 увеличила производительность в 5,5 раз).

Результаты выполненной работы могут быть успешно использованы для создания современных высокоэффективных технологических процессов изготовления или реновации изделий типа ступенчатых втулок с достаточно сложной формой наружной поверхности, а также могут быть внедрены в соответствующие учебные курсы и лабораторные работы кафедр “Технологии обработки материалов” и “Технологии обработки давлением”. Непосредственное отношение работа имеет к курсам технологии конструкционных материалов, технологии малоотходной объемной штамповки, технологии листовой штамповки и теории обработки металлов давлением.

В настоящее время находится в состоянии изготовления разработанный авторами штамповый инструмент для экспериментальной апробации получения с помощью вытяжки по внутренней поверхности наружной резьбы, а также внутренних или наружных шестигранников под ключ с целью эффективного производства резьбовых деталей достаточно сложной формы.

Вывод. Технологическая эффективность вытяжки по внутренней поверхности и подтвержденная точность установленных теоретиче-

ских зависимостей позволяют рекомендовать полученные результаты для практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о в к а и штамповка: Справочник под ред. Е.И. Семенова. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
2. П о п о в Е. А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
3. А в е р к и е в Ю. А., Б а ш к о в Б. В. Отбортовка с утонением стенки // Кузнечно-штамповочное производство. – 1976. – № 9. – С. 21–22.
4. К о в а л е в В. Г., Б о д и н В. В. Точность при отбортовке // Заготовительные производства в машиностроении. – 2005. – № 1. – С. 16–21.
5. В о р о н ц о в А. Л. Теория малоотходной штамповки. – М.: Машиностроение, 2005. – 859 с.
6. В о р о н ц о в А. Л. Теория штамповки выдавливанием. – М.: Машиностроение, 2004. – 721 с.
7. В о р о н ц о в А. Л. Технологические задачи теории пластичности. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2006. – 475 с.
8. Н и к о л а е в В. В. Разработка технологии горячей штамповки фланцев с развитой втулочной частью // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 6. – С. 13–15.
9. А в е р к и е в Ю. А., Б а ш к о в Б. В. Изготовление деталей типа втулки с фланцем протяжкой коническим пуансоном из механически обработанной заготовки // Кузнечно-штамповочное производство. – 1969. – № 7. – С. 12–13.
10. С т о р о ж е в М. В., П о п о в Е. А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
11. О в ч и н н и к о в А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.

Статья поступила в редакцию 26.10.2010

Андрей Львович Воронцов родился в 1955 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1978 г. Заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, профессор кафедры “Технологии обработки материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 395 научных работ по прикладной теории пластичности, обработке металлов давлением и обработке резанием.



A.L. Vorontsov (b. 1955) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1978. D. Sc. (Eng.), professor of “Technologies of Treatment of Materials” department of the Bauman Moscow State Technical University, Honored Scientist of the Russian Federation. Author of 395 publications in the field of applied theory of plasticity, noncutting shaping of metals and treatment by cutting.

Владимир Петрович Ступников родился в 1954 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1980 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Технологии обработки материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 40 научных работ по обработке металлов давлением.



V.P. Stupnikov (b. 1954) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1980. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Technologies of Treatment of Materials” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 40 publications in the field of noncutting shaping of metals.

Валерий Константинович Стратьев родился в 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии обработки материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 50 научных работ по обработке металлов давлением.



V.K. Strat'ev (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Technologies of Treatment of Materials” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 50 publications in the field of noncutting shaping of metals.

Наталья Андреевна Балахонцева родилась в 1980 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2003 г. Ассистент кафедры “Технологии обработки материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы по обработке металлов давлением.



N.A. Balakhontseva (b. 1980) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2003. Assistant lecturer of “Technologies of Treatment of Materials” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of one publication in the field of noncutting shaping of metals.