



Калюжный В. Л. /д. т. н./  
НТУУ «КПИ»



Калюжный А. В. /к. т. н./  
НТУУ «КПИ»



Пахолко С. А.  
НТУУ «КПИ»

## Исследование процесса отбортовки круглых отверстий профилированной листовой заготовки

*Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований отбортовки отверстий в традиционной и предварительно спрофилированной листовой заготовке. При отбортовке отверстий в традиционной заготовке имеет место разнотолщинность и искривление стенки после отбортовки. Использование спрофилированной заготовки обеспечивает постоянную толщину стенки и исключает искривление отбортованной части. Приведены аналитические зависимости для определения параметров профилирования заготовки и последующей отбортовки. Ил. 5. Библиогр.: 6 назв.*

**Ключевые слова:** отбортовка отверстий, традиционная и спрофилированная заготовка, усилие отбортовки, толщина и искривление стенки

*The results of calculation- experimental researches of burring in the traditional and pre-graded sheet parison are shown. During burring in the traditional work piece there takes place gage interference and wall cobble after processing. Usage of graded profile provides uniform wall thickness and excludes cobble of flanged area. Analytical dependences for determination of parameters of profiling of the billet and further treatment are given.*

**Keywords:** burring, traditional and graded workpiece, flanging force, thickness and wall cobble

Отбортовка отверстий в листовых заготовках и профилях – широко распространенная формаобразующая операция листовой штамповки. Часто детали, полученные отбортовкой, используются для образования разъемных и неразъемных соединений с другими изделиями. При проектировании технологии отбортовки расчеты в основном сводятся к определению коэффициента и усилия отбортовки [1, 2]. В работе [3] приведены данные по влиянию геометрической формы пуансонов на конечные форму и размеры отбортованной части традиционных листовых заготовок. Показано, что при отбортовке имеет место утонение с искривлением стенки. Влияние относительной толщины заготовки на утонение и искривление стенки при отбортовке круглых отверстий изучено в [4]. Аналогичные форма и размеры будут после отбортовки отверстий в профилях. Утонение и искривление стенки приводит к снижению надежности и долговечности соединений деталей с отбортованными отверстиями с другими изделиями.

Для получения постоянной толщины отбортованной части и исключения искривления стенки необходимо использовать предварительно спрофилированную заготовку, в которой часть, подлежащая отбортовке, имеет переменную толщину по длине [5, 6]. Профилирование заготовки можно осуществлять на стадии образования отверстия с использованием операций выдавливания с последующей пробивкой переемычки. Последовательность операций отбортовки с обеспечением толщины стенки, которая не меньше толщины исходной заготовки, приведена на рис. 1. Слева от осей симметрии показано исходное положение, справа – после деформирования. На первой операции (рис. 1а) в заготовке 1, которая установлена на плите 2 и зафиксирована прижимом 3 с необходимым профилем, пуансоном 4 выполняется выдавливание отверстия с образованием переемычки. При этом металл заполняет профиль прижима и образует утолщенную часть заготовки, которая в дальнейшем подлежит отбортовке.

На второй операции (рис.1 б) в спрофилированной заготовке 1, установленной на матрице 2, пуансоном 3 пробивается перемычка 4. Отбортовка спрофилированной заготовки 1, размещенной на матрице 2 и зафиксированной прижимом 3, выполняется на третьей операции при помощи пуансона 4 (рис. 1в). В результате получена сдеформированная часть с толщиной стенки не меньше толщины исходной заготовки и цилиндрической частью без искривления.

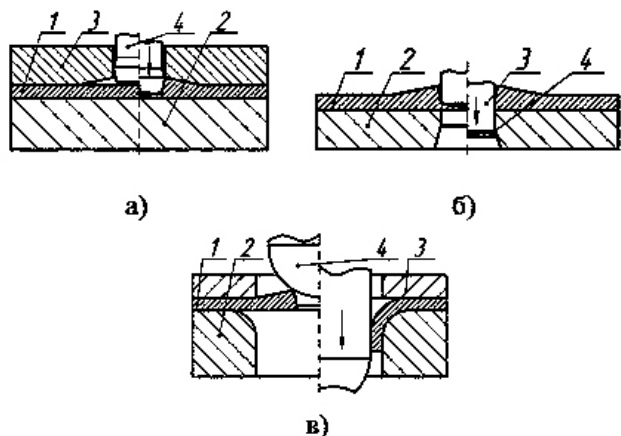


Рис. 1. Последовательность операций отбортовки с обеспечением толщины стенки, которая не меньше толщины исходной заготовки

Актуальными задачами является определение параметров отбортовки спрофилированной заготовки, которые обеспечивают повышение качества изделий.

Схемы отбортовки отверстий в традиционной и спрофилированной листовых заготовках приведены на рис. 2.

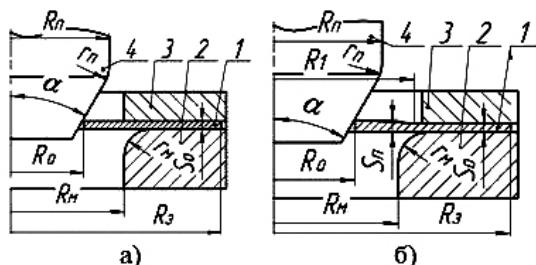


Рис. 2. Схемы отбортовки: а - традиционной заготовки; б - спрофилированной заготовки

Заготовка 1 размещена между матрицей 2 и прижимом 3 и деформируется коническим пуансоном 4. Определение параметров отбортовки отверстия в традиционной листовой заготовке, а также установление формы и размеров спрофилированной заготовки (толщины профиля  $S_n$  и радиуса  $R_1$ ), которые обеспечивают постоянную толщину сдеформированной части после отбортовки, было выполнено моделированием методом конечных элементов (МКЭ) с применением программы DEFORM. Традиционная заготовка из пластичного алюминия имела следующие размеры: радиус  $R_3 = 50$  мм, толщина  $S_0 = 1,5$  мм, радиус отверстия  $R_0 = 10$  мм. Для анализа операций профилирования заготовки под отбортовку использовали исходную заготовку аналогичных размеров без отверстия. Размеры

деформирующего инструмента: пуансона - радиусы  $R_n = 20$  мм и  $r_n = 5$  мм, угол  $\alpha = 30^\circ$ ; матрицы - радиусы  $R_m = 21,5$  мм и  $r_m = 7$  мм.

Моделированием МКЭ были определены форма и размеры профиля исходной заготовки, которые после отбортовки обеспечили постоянную толщину стенки (1,5 мм) после отбортовки: толщина  $S_n = 2,2$  мм с линейным убыванием до исходной толщины  $S_0$  на радиусе  $R_1 = 27$  мм. Расчетные данные по профилированию заготовки приведены на рис. 3. Наибольшие энергосиловые затраты имеют место на стадии профилирования исходной листовой заготовки под отбортовку. Зависимость усилия формообразования отверстия выдавливанием от перемещения пуансона приведена на рис. 3а. В конце выдавливания усилие достигает 180 кН. Использование выдавливания при образовании отверстия, по сравнению с традиционными способами сверления или пробивки, позволяет осуществлять экономию металла до 75 % на одном отверстии. Максимальное усилие пробивки перемычки составило 2,7 кН. Форма и размеры сдеформированных заготовок после формообразования отверстия конусным пуансоном с углом  $164^\circ$  при вершине и пробивки перемычки, которые получены МКЭ, показаны на рис. 3б и 3в соответственно. Толщина перемычки на оси заготовки составляет 0,3 мм, при этом формируется необходимый профиль заготовки. Нужно отметить, что пробивку перемычки можно совместить с отбортовкой отверстия.

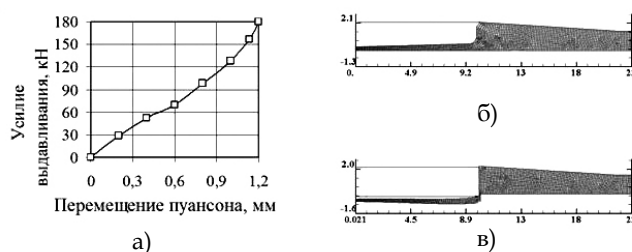
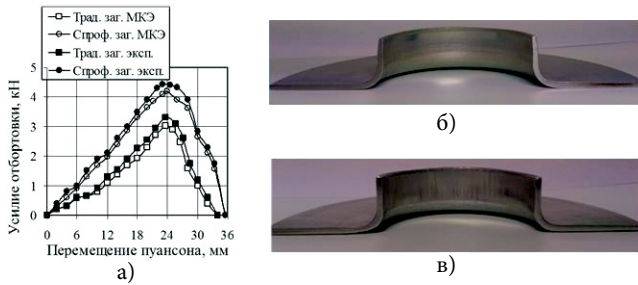


Рис. 3. Результаты расчета профилирования заготовки: а - зависимость усилия выдавливания от перемещения пуансона; б и в - форма и размеры в миллиметрах сдеформированных заготовок после выдавливания и пробивки перемычки соответственно

Экспериментальные исследования отбортовки традиционной и предварительно спрофилированной заготовки проводились на испытательной машине TIRA test 2300. На рис. 4 приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований отбортовки отверстий в традиционной и спрофилированной заготовке.

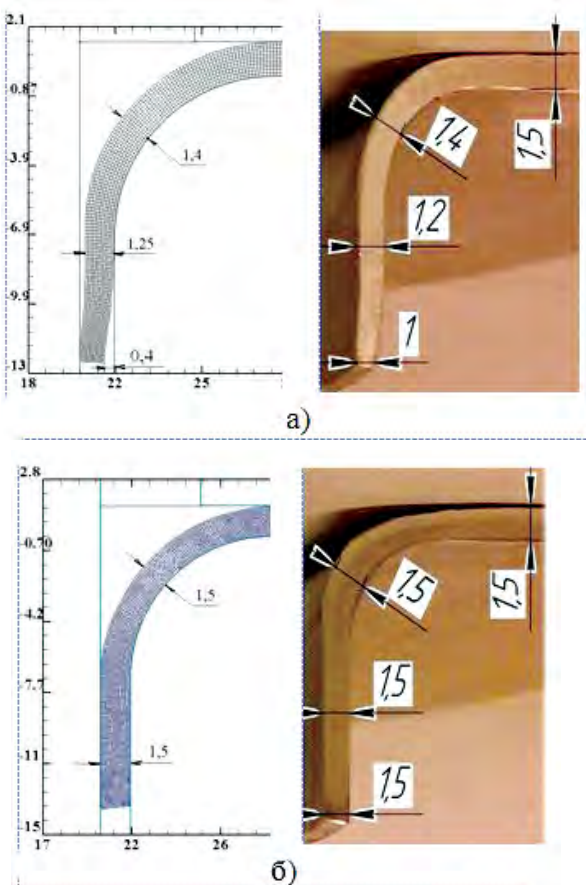
Зависимости усилия отбортовки от перемещения пуансона при формоизменении традиционной и спрофилированной заготовки показаны на рис. 4а. Усилие деформирования спрофилированной заготовки больше от отбортовки традиционной заготовки, что связано с упрочнением металла на стадии формообразования отверстия выдавливанием. Максимальная величина усилия отбортовки традиционной заготовки со-

ставила 3 кН, спрофилированной – 4,2 кН. На графиках отмечены экспериментальные данные. Максимальные отличия в расчетных и экспериментальных данных составило до 6 %. На рис. 4б показана в разрезе сдеформированная традиционная заготовка, на рис. 4в – сдеформированная спрофилированная заготовка.



**Рис. 4. Результаты расчетно-экспериментальных исследований отбортовки отверстий в традиционной и спрофилированной заготовке:** а – зависимости усилия отбортовки от перемещения пуансона, б и в – сдеформированные традиционная и спрофилированная заготовки в разрезе соответственно

Расчетные и экспериментальные формы и размеры сдеформированных частей традиционной и спрофилированной заготовок приведены на рис. 5.



**Рис. 5. Расчетные и экспериментальные форма и размеры в миллиметрах сдеформированных частей:** а – традиционной заготовки; б – спрофилированной заготовки

На расчетных данных тонкими линиями показан деформирующий инструмент. При отбортовке традиционной заготовки имеет место утонение с искривлением стенки. Расчетные данные

МКЭ и результаты экспериментов практически совпадают. Наличие утонения приводит к снижению надежности и долговечности соединений отбортованных деталей с другими изделиями. Использование предварительно спрофилированной заготовки с установленными размерами  $S_n = 2,2$  мм и  $R_1 = 27$  мм (см. рис. 2) позволило получить расчетным и экспериментальным путем постоянную толщину стенки сдеформированной части заготовки, которая равняется исходной толщине  $S_0 = 1,5$  мм.

Для инженерных расчетов параметров формообразования отверстия выдавливанием при профилировании листовой заготовки, а также отбортовки спрофилированной заготовки был выполнен теоретический анализ этих процессов методом совместного решения приближенных дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности. Получены аналитические зависимости для определения напряженно-деформированного состояния заготовок на промежуточных стадиях выдавливания и отбортовки, когда возникает максимальное усилие деформирования.

Усилие  $P_{д,выд}^{max}$  формообразования отверстия выдавливанием можно определить по формуле

$$P_{д,выд}^{max} = 3,14 R_{II}^2 \cdot \sigma_s^{sp} \left\{ 0,5 \ln \frac{S_0}{h + \alpha R_{II}} + \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{4\mu} \left[ \left( \frac{h + \alpha R}{h} \right)^{\frac{2\mu}{\alpha}} + 1 \right] + \frac{\alpha}{2\mu} \right\},$$

где  $R_{II}$  – радиус конического торца пуансона с углом конуса при вершине  $\alpha = 176^\circ \div 170^\circ$ ,  $S_0$  – толщина листовой заготовки,  $h$  – высота перемычки по оси пуансона после выдавливания,  $\mu$  – коэффициент трения.

Среднее значение истинного напряжения в очаге деформации при выдавливании рассчитывается по выражению

$$\sigma_s^{sp} = \frac{\sigma_e}{1 - \psi_{ш}} \left( \frac{S_0 - h - 0,5 R_{II} \alpha}{S_0 \psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}},$$

где  $\sigma_e$  – предел прочности материала листовой заготовки,  $\psi_{ш}$  – относительное сужение, соответствующее моменту образования шейки на образце при испытании на растяжение.

Размеры предварительно спрофилированной заготовки в вышеприведенных обозначениях (см. рис. 2б) для получения отбортованной части с постоянной толщиной стенки, которая равняется толщине  $S_0$ , можно рассчитать по выражениям:

$$S_n = S_0 \left[ 2 \ln \frac{R_n}{R_0} + 1 + 1,5 \ln \frac{R_n}{R_0} \right]; \quad R_1 = 0,95 (R_n + r).$$

Максимальное значение усилия отбортовки

$P_{д,отб}^{max}$  предварительно спрофилированной заготовки конусным пуансоном определяется по формуле

$$P_{д,отб}^{max} = 1,57 R_n S_o \sigma_s^{cp} (tg^2 \alpha + \sin^2 \alpha) (1 + \mu / tg \alpha) \times \left[ \frac{4}{2 - \sin^2 \alpha} - 1 - \frac{1,5 \sin^2 \alpha}{tg^2 \alpha + \mu \cdot tg \alpha + 2} \right] / \cos \alpha$$

Среднее значение истинного напряжения в очаге деформации при отбортовке рассчитывается по выражению

$$\sigma_s^{cp} = \frac{\sigma_s}{1 - \psi_{ш}} \left[ \frac{R_n \cos^2 \alpha - R_o}{R_n \cos^2 \alpha + R_o} \right]^{1 - \psi_{ш}}$$

### Выводы

В работе проведены расчетно-экспериментальные исследования отбортовки отверстий в традиционной листовой заготовке и предварительно спрофилированной заготовке.

Показано, что использование спрофилированной заготовки приводит к получению постоянной толщины стенки, исключает разнотолщинность и искривление сдеформированной части заготовки, которые имеют место и являются недостатками при отбортовке традиционной заготовки. Методом конечных элементов выполнен анализ профилирования исходной заготовки выдавливанием конусным пуансоном с последующим выполнением пробивкой перемычки и отбортовки. Установлены размеры профиля, обеспечивающие после отбортовки постоянную толщину стенки, которая равняется толщине исходной заготовки. Приведены аналитические зависимости для определения усилия профилирования заготовок выдавливанием, формы и размеров профиля, усилия отбортовки.



УДК 621.771.016

Николаев В. А. /д. т. н./, Жученко С. В.

ЗГИА

Наука

## Определение прогибов и профилировки валков полосовых прокатных станов

Установлено, что неравномерность погонных сил в контакте с полосой существенно зависит от различия обжатий по ширине полосы, а следовательно, и от отношения В/Л. Получены формулы для расчета коэффициента неравномерности  $n_1$  в зависимости от различия обжатий по ширине полосы и отношения В/Л. Показано, что при  $n_1 \neq 1,0$  и  $V/L < 0,7$  величина профилировки рабочего вала заметно зависит от ширины полосы. На величину профилировки рабочего вала существенное влияние оказывает диаметр рабочих валков, используемых на стане, особенно при прокатке узких полос. Ил. 1. Табл. 1. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** прокатка, полоса, прогиб, расчет, неравномерность, сила прокатки, обжатие

*It is determined that nonuniformity of forces per unit length in touch with the band significantly depends on the differences of edge reduction of the band and consequently on the correlation of V/L. Formulas for calculation of irregularity coefficient  $n_1$  depending on the differences of reduction of band edges and correlation of V/L are obtained. It is shown that at  $n_1 \neq 1,0$  and  $V/L < 0,7$  the value of profiling of work roll depends on the band width. Diameter of working rolls used on the mill, especially during rolling of narrow bands, affects the value of profiling of working roll.*

**Keywords:** rolling, band, bend, calculation, nonuniformity, rolling force, cobbing

### Библиографический список

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. / В. П. Романовский – Ленингр. отд-ние: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник: в 4 т. Т. 4 Листовая штамповка / Под ред. А. Д. Матвеева; Ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985-1987. – 544 с.
3. Калюжный А. В. Анализ силовых режимов и качества изделий при отбортовке пуансоном разной геометрической формы / А. В. Калюжный, С. А. Пахолко // Вестник НТУУ «КПИ». сер. Машиностроение. – Киев. – 2011 – № 63. – С. 123-127.
4. Калюжный А. В. Расчетно-экспериментальный анализ влияния относительной толщины заготовки на силовые режимы и качество изделий при отбортовке / А. В. Калюжный, С. А. Пахолко // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – ДГМА. – Краматорск. – 2011– № 3 (28). – С. 177-183.
5. Калюжный В. Л. Исключение утонения и искривления торца стенки при отбортовке отверстий / В. Л. Калюжный, С. А. Пахолко, И. П. Куликов. // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков. – 2011 – № 46. – С. 41-48.
6. Пат. 69344 Украина, МПК 21D 26/02. Способ отбортовки отверстий / Калюжный А. В., Пахолко С. А., Куликов И. П. // Заявл. 18.10.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8/2012.

Поступила 08.07.2014