

УДК 621.774

Алиева Л. И.  
Грудкина Н. С.  
Жбанков Я. Г.  
Крюгер К.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ В ПРОЦЕССАХ КОМБИНИРОВАННОГО РАДИАЛЬНО-ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Полые детали типа стаканов и втулок с фланцами используют в качестве корпусов, креплений, опорных поверхностей и т. д. при изготовлении различных машин и механизмов. На машиностроительных предприятиях такие детали в основном изготавливаются механической обработкой резанием, обладающей такими недостатками как повышенная трудоемкость и низкий коэффициент использования металла за счет удалений излишков металла в стружку. Последняя особенность является особо важной при изготовлении деталей из дорогостоящих цветных металлов и сплавов.

Альтернативой способам механической обработки являются способы обработки металлов давлением, особое место среди которых занимает холодная объемная штамповка. Данный вид обработки обладает такими достоинствами как благоприятная макроструктура металла после деформаций за счет его проработки (возможно, заменять марки материалов за счет повышения механических характеристик материала) и отсутствия перерезанных волокон и высоким коэффициентом использования металла (при выдавливании деталей простых форм может достигать до 100 %). Однако при получении сложнопрофильных деталей методами холодной объемной штамповки, и в частности, методом комбинированного выдавливания, можно столкнуться с проблемой образования различного вида дефектов. Метод верхней оценки при помощи кинематически возможных полей скоростей позволяет предсказать появление дефектов (поверхностных утяжин) и анализировать сам процесс дефектообразования. В своих работах Х. Кудо впервые указал на тот факт, что кинематически возможные поля скоростей, соответствующие картине течения металла при образовании дефектов дают более низкую оценку приведенного давления по сравнению с кинематически возможными полями скоростей, не учитывающими образование подобного рода дефектов [1]. Следовательно, использование первых кинематически возможных полей скоростей представляется более рациональным, чем вторых.

Одним из характерных дефектов, возникающих в процессе деформирования полых деталей с фланцем, является утяжина в донной части стакана [2]. По экспериментальным наблюдениям возникновение такого дефекта возможно при достаточно большом значении  $S/R_1$  и достаточно малом значении  $h/R_1$ . При этом потоки металла, истекающего в горизонтальном направлении, испытывают сильное влияние потоков металла, истекающего в вертикальном направлении, что приводит к искривлению траектории движения, и как следствие, к образованию дефекта в виде утяжины в донной части стакана. Анализ влияния геометрических и технологических параметров процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания на возможность образования дефекта подобного рода требует особого внимания. Определение критических с точки зрения дефектообразования параметров процесса позволит оценить возможность расширения области применения методов комбинированного выдавливания.

Целью данной работы является разработка математической модели образования дефекта в виде утяжины в донной части детали с помощью метода верхней оценки и исследование влияния на ее образование геометрических параметров процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания.

Рассмотрим математическую модель процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания детали типа «стакан с фланцем» с образованием дефекта в виде утяжины в донной части (рис. 1) методом верхней оценки.

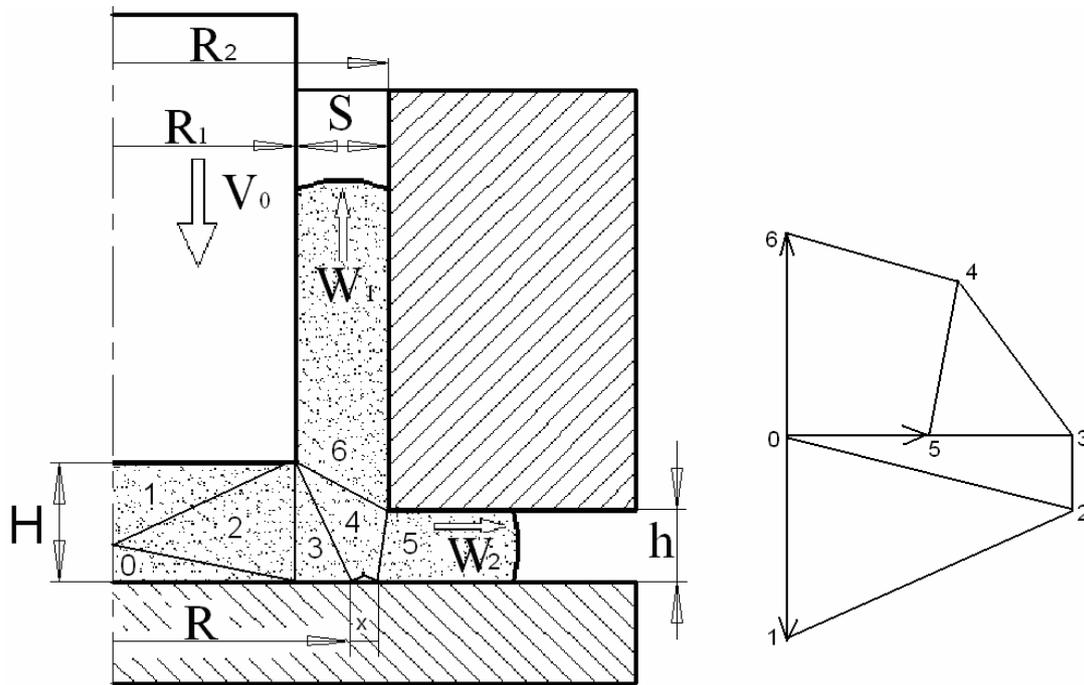


Рис. 1. Схема очага деформации и годограф скоростей процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания

Анализ годографа скоростей позволил определить горизонтальные и вертикальные составляющие скоростей смещения кинематических элементов относительно друг друга и поверхности инструмента (табл. 1), используя некоторые дополнительные обозначения:

$$W_1 = \lambda V_0; \quad W_2 = \frac{R_1 V_0 - S W_1}{h}; \quad T = \frac{H - h}{S}. \quad (1)$$

Таблица 1

Горизонтальные и вертикальные составляющие скоростей смещения кинематических элементов

	$x(v_i)$	$y(v_i)$
1	0	$-V_0$
2	$\frac{R_1}{H} V_0$	$-\frac{V_0}{4}$
3	$\frac{R_1}{H} V_0$	0
4	$\frac{W_1 \cdot (R - R_1) - x_3 \cdot H}{T \cdot (R - R_1) - H}$	$\frac{-W_1 + x_3 \cdot T}{T \cdot (R - R_1) - H} \cdot H$
5	$W_2$	0
6	0	$W_1$

Длины границ контакта между кинематическими элементами и с инструментом определены из расчётной схемы следующим образом:

$$\begin{aligned}
 l_{12} &= \sqrt{\left(\frac{3}{4}H\right)^2 + R_1^2}; & l_{46} &= \sqrt{(H-h)^2 + S^2}; \\
 l_{02} &= \sqrt{\left(\frac{1}{4}H\right)^2 + R_1^2}; & l_{06} &= H-h+l_{k2}; \\
 l_{34} &= \sqrt{H^2 + (R-R_1)^2}; & l_{03} &= R-R_1; \\
 l_{45} &= \sqrt{h^2 + (R_2-R-x)^2}; & l_{16} &= l_{k2}; \\
 l_{05} &= R_2-R-x+2l_{k1}; & l_{23} &= H.
 \end{aligned}$$

Приведенное давление можно записать в виде:

$$\bar{p} = \frac{1}{2R_1V_0} (v_{12}l_{12} + v_{23}l_{23} + v_{34}l_{34} + v_{45}l_{45} + v_{46}l_{46} + 2\mu_S(v_{03}l_{03} + v_{16}l_{16} + v_{05}l_{05} + v_{06}l_{06})). \quad (2)$$

Чтобы получить зависимость для реально существующей утяжины, продифференцируем полученное выше выражение по переменным  $R$  и  $x$  и решим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2V_0R_1} \left( -2\mu_S W_2 - (x_4 - W_2) \left( 1 - \frac{h^2}{(R_2 - R - x)^2} \right) \right) = 0; \\ \frac{1}{2V_0R_1} \left( (x_4)' \cdot \left( \frac{h^2 + (R_2 - R - x)^2}{R_2 - R - x} - \frac{H^2 + (R - R_1)^2}{R - R_1} + \frac{(H - h)^2 + s^2}{s} \right) - \right. \\ \left. - (x_4 - W_2) \left( 1 - \frac{h^2}{(R_2 - R - x)^2} \right) + (x_4 - x_3) \cdot \left( \frac{H^2}{(R - R_1)^2} - 1 \right) + 2\mu_S(-W_2 + x_3) \right) = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

После соответствующих преобразований, полагая  $\lambda \rightarrow \frac{R_1}{s}$ , получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = R_2 - R - h; \\ (x_4)' \cdot \left( \frac{h^2 + (R_2 - R - x)^2}{R_2 - R - x} - \frac{H^2 + (R - R_1)^2}{R - R_1} + \frac{(H - h)^2 + s^2}{s} \right) + \\ + x_4 \cdot \left( \frac{H^2}{(R - R_1)^2} - 1 \right) + (1 - 2\mu_S - \frac{H^2}{(R - R_1)^2}) \cdot x_3 = 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Решая численно полученную систему уравнений, получаем функцию ширины образующейся утяжины  $x(H, h, R_1, R_2, \mu_S)$  и функцию  $H_{крит.}(h, R_1, R_2, \mu_S)$ , соответствующую началу образования утяжины.

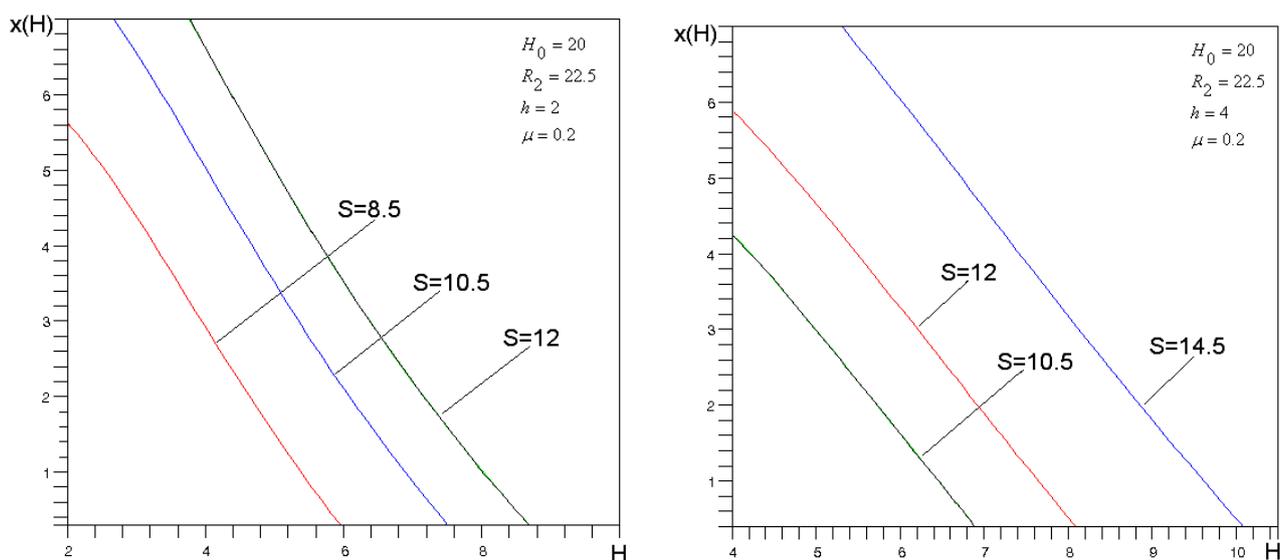


Рис. 2. Графики зависимости ширины утяжины  $x(H)$  от геометрических параметров процесса

Следует отметить, что условия, при которых выбрана данная расчётная схема и кинематически возможное поле скоростей, не допускают превышения  $R$  над  $R_2$  и положения пунсона при  $H \leq h$  (нарушение данных условий приведёт к выбору нового кинематически возможного поля скоростей). Следовательно, приведенные выше функции определены при  $R \in (R_1, R_2)$  и рассматриваются в области значений  $H > h$ .

Были проведены также исследования с помощью метода конечных элементов, реализованного в программе QForm-2D, позволяющего с достаточной степенью достоверности определять параметры формоизменения в процессах выдавливания [3, 4]. Производилось моделирование комбинированного радиально-обратного выдавливания сплошной заготовки из материала АД1. Трение задавалось константой поверхности по А. Н. Леванову равной 0,2, кривая упрочнения материала заготовки задавалась в виде аппроксимированной зависимости  $\sigma_s = 131 \cdot e^{0.28}$ , модуль Юнга 75000 МПа, коэффициент Пуассона 0,32. Моделировалось выдавливание стакана с фланцем с размерами  $R_2 = 22,5$ ;  $h = [1...3]$  мм и  $R_1 = [10,5...14]$  мм. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры стакана с фланцем, соответствующие началу образования утяжины, полученные в пакете QForm-2D и с помощью метода верхней оценки

	$R_1$ , мм	$S$ , мм	$h$ , мм	$H_{QForm-2D}$ , мм	$H_{теорет.}$ , мм
$H_0 = 20$ $R_2 = 22,5$ $\mu_S = 0,2$	10,5	12	3	6,7	8,7
			2	8	9
			1	8,6	9,3
	12	10,5	3	5,7	7,4
			2	6,8	7,8
			1	7,4	8,1
	14	8,5	3	4,4	5,6
			2	5,6	6,2
			1	6	6,5

Установлено, что утяжина в нижней части детали образуется на последней стадии выдавливания при достаточно больших значениях  $s/R_2$  и достаточно малых значениях  $h/s$ , когда течения металла в радиальном направлении практически отсутствует ( $\lambda \rightarrow R_1/s$ ), а основная часть металла заготовки течет вертикально вверх. Увеличение ширины стенки стакана  $S$  при сохранении остальных параметров процесса влечёт за собой увеличение величины  $H_{крит}$ , соответствующей началу образования утяжины, а также увеличение ширины утяжины  $x(H)$ . Увеличение высоты фланца  $h$  при сохранении остальных параметров процесса влечёт за собой уменьшение значений  $H_{крит}$  и  $x(H)$ . При  $h/s < 0,4$   $H_{крит}$  превышает значение высоты фланца и позволяет использовать предложенную модель образования утяжины. При этом допущение  $\lambda \rightarrow R_1/s$  на всём протяжении процесса образования утяжины не приводит к значительному завышению значений  $H_{крит}$ . (относительная погрешность не превышает 10–25 %) по сравнению с результатами, полученными с помощью QForm-2D.

### ВЫВОДЫ

Одним из характерных дефектов, возникающих в процессе деформирования полых деталей с фланцем, является утяжина в донной части стакана. На основе метода верхней оценки получены зависимости ширины утяжины от геометрических параметров процесса, а также определены значения толщины дна стакана  $H_{крит}$ , соответствующие началу образования утяжины (при  $h/s < 0,4$   $H_{крит}$  превышает значение высоты фланца, что позволяет использовать предложенную модель образования утяжины). Проведено моделирование комбинированного радиально-обратного выдавливания заготовки из материала АД1 с помощью программного пакета QForm-2D.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Cold Forging of Hollow Cylindrical Components Having an Intermediate Flange – Ubet Analysis and Experiment* / Н. Kudo, В. Avitzur, Т. Yoshikai, J. Luksza a. o. // *CIRP Annalen*. – 1980. – № 29. – P. 129–133.
2. Алиева Л. И. Особенности формоизменения в процессах комбинированного радиально-обратного выдавливания / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, Н. С. Грудкина // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА. – 2010. – № 3(24). – С. 19–24.
3. Алиев И. С. Моделирование процессов комбинированного выдавливания / И. С. Алиев, Е. М. Солодун, К. Крюгер // *Механика деформированного твёрдого тела и обработка металлов давлением : сборник научных трудов*. – Тульский гос. унив-т : Тула, 2000. – С. 21–27.
4. Алиева Л. И. Исследование процессов радиального выдавливания методом конечных элементов / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, П. Абхари // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА. – 2009. – № 1 (20). – С. 19–24.

Алиева Л. И. – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры ОМД ДГМА;

Грудкина Н. С. – ассистент кафедры ВМ ДГМА;

Жбанков Я. Г. – ассистент кафедры ОМД ДГМА;

Крюгер К. – канд. техн. наук, доц. ТУД.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ТУД – Технический университет Дрездена, Германия.

E-mail: omd@dgma.donetsk.ua