

УДК 621.771.014

Капелюшный В. П.
Нехаев Н. Е.**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА
ПРИ ОБЖАТИИ КРУГЛЫХ ЗАГОТОВОК В ОТКРЫТЫХ
ТАВРОВЫХ КАЛИБРАХ**

Тавровые профили с равнотолщинными элементами относятся к 29 группе, XI класса, согласно технологической классификации и применяются в различных отраслях промышленности, в том числе, в строительстве при изготовлении металлоконструкций для перекрытий, при изготовлении оконно-фонарных переплетов, а также в автомобильной промышленности для изготовления тормозных колодок для колес автомобилей [1, 2].

Производство тавровых профилей в зависимости от объема заказа может осуществляться на высокопроизводительных непрерывных станах, на непрерывных малоклетевых станах. Прокатка фасонных спецпрофилей, в том числе и тавровых, на высокопроизводительных прокатных станах экономически невыгодна, так как отпускная цена не покрывает расходов на производство.

Поэтому прокатку тавровых профилей малотоннажными партиями целесообразно осуществлять на малоклетевых станах, на которых, как правило, применяется индукционный нагрев металла, а в качестве исходной заготовки используется круглая заготовка.

В работе [4] выполнено экспериментальное исследование формоизменения металла при обжатии прямоугольных заготовок в открытых балочных калибрах, применительно к тавровым профилям с массивными элементами.

Прокатку тавровых профилей на малоклетевых станах можно осуществлять по двум схемам, а именно, по первой схеме предусматривается из круглой заготовки, формировать тавровый подкат с массивной полкой в двух калибрах балочного типа, а по второй схеме в первом проходе применяется разрезной трехвалковый калибр, где из исходной заготовки круглого сечения формируется тавровый подкат, подобный готовому профилю. Трехвалковый калибр можно образовать, используя кассету с неприводными вертикальными валками, установленными в клетки дуо [5].

Целью данной работы является определение параметров формоизменения при обжатии круглых заготовок в первых формообразующих калибрах.

При прокатке фасонных спецпрофилей на малоклетевых станах особенно важное значение имеет определение параметров формоизменения при обжатии круглых заготовок в первых формообразующих калибрах.

На полупромышленном стане 300 ДГТУ выполнено экспериментальное исследование формоизменения при обжатии круглых заготовок в открытом двухвалковом калибре тавровой формы (рис. 1) и трехвалковом калибре (рис. 2).

Для стабильности прокатки при несимметричной разрезке круглой заготовки в двухвалковом калибре применялась новая конструкция валковой арматуры – сквозная линейка, а обжатие круглых заготовок в трехвалковом калибре осуществлялось в четырехвалковой клетке конструкции ДГТУ [5] с вертикальными неприводными валками.

Принимая во внимание, что в производственных условиях при прокатке соответствующих профилей формоизменение металла, в основном, зависит от геометрических параметров очага деформации, при исследовании в качестве независимых переменных приняли следующие безразмерные величины, характеризующие форму исходной заготовки и калибра:

для первого случая (рис. 1):

$$m_1 = \frac{2r}{h}; \quad m_2 = \frac{a}{r}; \quad m_3 = \frac{2R_1}{h}. \quad (1)$$

Для второго случая (рис. 2):

$$m_1 = \frac{h}{R_1}; \quad m_2 = \frac{b}{R_1}; \quad m_3 = \frac{2r}{R_1}, \quad (2)$$

где h – толщина стенки; b – толщина полки; r – радиус заготовки; a – расстояние от оси круглой заготовки до торца валка; R_1 – радиус горизонтальных валков; R_2 – радиус вертикальных валков; B – ширина стенки после прокатки; H – высота полки после прокатки.

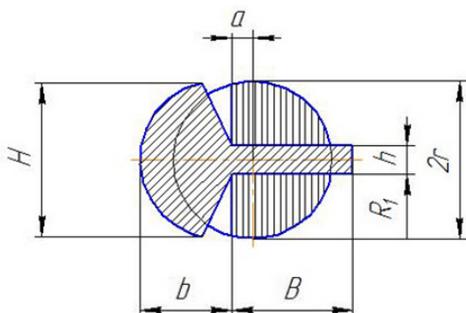


Рис. 1. Поперечное сечение очага деформации при прокатке круглой заготовки в двухвалковом калибре

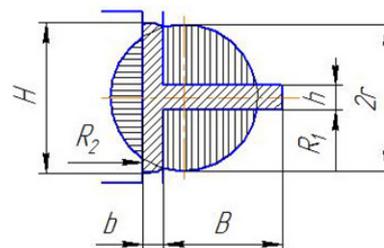


Рис. 2. Поперечное сечение очага деформации при прокатке круглой заготовки в трехвалковом калибре

В процессе проведения исследований выдерживались постоянными следующие параметры: марка стали образцов Ст3; скорость прокатки – 0,5 м/с; температура прокатки – 1100–1050 °С; марка стали валков – сталь 45; диаметр валков – 300, 320 и 190 мм.

В результате проведенного анализа существующих калибровок тавровых профилей выбраны следующие пределы изменения относительных и размерных параметров:

для первого случая:

$$\begin{aligned} 1,3 \leq m_1 \leq 1,8; & \quad R_1 = 150 \text{ мм}; \\ -0,3 \leq m_2 \leq 0,3; & \quad r = 13 \dots 27 \text{ мм}; \\ 10 \leq m_3 \leq 15; & \quad a = -8,1 \dots +8,1; \\ & \quad h = 20 \dots 30 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Для второго случая:

$$\begin{aligned} 0,0375 \leq m_1 \leq 0,0625; & \quad R_1 = 150 \text{ мм}; \\ 0,0375 \leq m_2 \leq 0,0625; & \quad R_2 = 95 \text{ мм}; \\ 0,15 \leq m_3 \leq 0,1875; & \quad h = 6 \dots 10 \text{ мм}; \\ & \quad b = 6 \dots 10 \text{ мм}; \\ & \quad r = 12 \dots 15 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Переход от безразмерных параметров m_i к нормированным факторам x_i , упрощающим вычисления, осуществляем по формулам:

$$x_i = \frac{m_i - m_{i \text{cp.}}}{0,5 \Delta m_i}, \quad (3)$$

где:

$$m_i = \frac{m_{i \text{max}} + m_{i \text{min}}}{2}; \quad (4)$$

$$\Delta m_i = m_{i \max} - m_{i \min}, \quad (5)$$

где $m_{i \min}$ и $m_{i \max}$ – верхний и нижний предел изменения m_i .

С учетом (3...5) имеем формулы преобразования:

для первого случая:

$$X_1 = 4m - 6; \quad (6)$$

для второго случая:

$$\begin{aligned} X_1 &= 80m_1 - 4, \\ X_2 &= 80m_2 - 4, \end{aligned} \quad (7)$$

$$X_3 = 11,85m_3 - 0,444.$$

Для исследования формоизменения металла при обжатии круглых заготовок в открытых тавровых калибрах приняли следующие функции отклика:

$$\lambda = \frac{\ell_1}{\ell_0} - \text{коэффициент вытяжки};$$

$$\beta = \frac{B}{2r} - \text{коэффициент уширения стенки};$$

$$\delta = \frac{H}{2r} - \text{коэффициент утяжки полок}.$$

Для получения линейных моделей искомых зависимостей используем полный факторный план 2^3 , включающий 8 точек. Матрицы планов, расчетные размеры образцов, калибров и экспериментальные результаты прокатки представлены для первого и второго случаев, соответственно в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Матрица плана, размеры образцов, калибров и результаты исследований для двухвалкового калибра

№ п/п	X_1	X_2	X_3	m_1	m_2	m_3	R_1 , мм	r , мм	h , мм	a	λ
1	-1	-1	-1	1,3	-0,3	10,0	150	19,5	30	-5,85	1,04
2	+1	-1	-1	1,8	-0,3	10,0	150	27,0	30	-8,1	1,11
3	-1	+1	-1	1,3	+0,3	10,0	150	19,5	30	+5,85	1,004
4	+1	+1	-1	1,8	+0,3	10,0	150	27,0	30	+8,1	1,08
5	-1	-1	+1	1,3	-0,3	15,0	150	13	20	-3,9	1,03
6	+1	-1	+1	1,8	-0,3	15,0	150	18	20	-5,4	1,13
7	-1	+1	+1	1,3	+0,3	15,0	150	13	20	+3,9	1,005
8	+1	+1	+1	1,8	+0,3	15,0	150	18	20	+5,4	1,03

После обработки результатов исследований проведена оценка коэффициентов модели на значимость по критерию Стьюдента при 5 % уровне достоверности. Незначимые члены моделей отброшены. В результате обработки экспериментальных данных и осуществляя переход от кодированных переменных x_i по формуле (6) для первого случая и по формуле (7) для второго случая получены следующие линейные зависимости:

для первого случая:

$$\begin{aligned} \lambda = \frac{\ell_1}{\ell_0} &= 0,0045 + 0,178m_1 + 0,217m_2 + 0,0028m_3 - \\ &- 0,105m_1m_2 - 0,0032m_1m_3 - 0,010m_2m_3, \end{aligned} \quad (8)$$

Средняя ошибка аппроксимации $\varepsilon = 1,2\%$.

Для второго случая:

$$\lambda = 3,38 - 27,7m_1 - 30,3m_2 + 1,93m_3 + 720m_1m_2 - 19,0m_1m_3 + 7,11m_2m_3, \quad (9)$$

$$\beta = 1,103 + 0,506m_1 - 2,87m_2 - 0,156m_3 + 3,64m_1m_2 + 19,32m_1m_3 + 10,55m_2m_3 - 331,8m_1m_2m_3, \quad (10)$$

Средняя ошибка аппроксимации $\varepsilon = 2,18\%$.

$$\delta = 1,34 - 4,59m_1 + 1,01m_2 - 0,096m_3 - 13,33m_1m_2 + 14,2m_1m_3 + 13,0m_2m_3 - 284,0m_1m_2m_3, \quad (11)$$

Средняя ошибка аппроксимации $\varepsilon = 0,46\%$.

Таблица 2

Матрица плана, размеры образцов, калибров и результаты исследований для трехвалкового калибра

№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	m ₁	m ₂	m ₃	h, мм	b, мм	r, мм	B, мм	H, мм	δ	β	λ
1	+1	+1	+1	0,0625	0,0625	0,1875	10	10	30	30,6	31,2	1,04	1,02	1,46
2	-1	+1	+1	0,0375	0,0625	0,1875	6	10	30	30,2	35,6	1,19	1,006	1,57
3	+1	-1	+1	0,0625	0,0375	0,1875	10	6	30	33,5	31,5	1,05	1,117	1,57
4	-1	-1	+1	0,0375	0,0375	0,1875	6	6	30	32,5	35,1	1,17	1,08	1,96
5	+1	+1	-1	0,0625	0,0625	0,15	10	10	24	22,9	25,7	1,07	0,95	1,26
6	-1	+1	-1	0,0375	0,0625	0,15	6	10	24	22,4	28,9	1,2	0,93	1,32
7	+1	-1	-1	0,0625	0,0375	0,15	10	6	24	24,1	25,5	1,06	1,004	1,4
8	-1	-1	-1	0,0375	0,0375	0,15	6	6	24	23,9	28,6	1,19	0,996	1,6

$$R_1 = 160 \text{ мм}; R_2 = 95 \text{ мм}.$$

При переходе от кодированных переменных к натуральным формулы (8–11) будут иметь вид:

для первого случая:

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = 0,0045 + 0,178 \frac{2r}{h} + 0,217 \frac{a}{r} + 0,0028 \frac{2R}{h} - 0,105 \frac{2r \cdot a}{h \cdot r} - 0,0032 \frac{4r \cdot R_1}{h^2} - 0,0105 \frac{2a \cdot R_1}{r \cdot h}, \quad (12)$$

Для второго случая:

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = 3,38 - 27,7 \frac{h}{R_1} - 30,3 \frac{b}{R_1} + 1,93 \frac{2r}{R_1} + 720 \frac{h \cdot b}{R_1^2} - 19,0 \frac{2h \cdot r}{R_1^2} + 7,11 \frac{2b \cdot r}{R_1^2}, \quad (13)$$

$$\beta = \frac{B}{2r} = 1,103 + 0,505 \frac{h}{R_1} - 2,87 \frac{b}{R_1} - 0,156 \frac{2r}{R_1} + 3,64 \frac{h \cdot b}{R_1^2} + 19,32 \frac{2h \cdot r}{R_1^2} + 10,55 \frac{2b \cdot r}{R_1^2} - 330,0 \frac{2h \cdot b \cdot r}{R_1^3}, \quad (14)$$

$$\delta = \frac{H}{2r} = 1,34 - 4,59 \frac{h}{R_1} + 1,09 \frac{b}{R_1} - 0,895 \frac{2r}{R_1} - 13,33 \frac{2h \cdot b}{R_1^2} +$$

$$+ 14,2 \frac{2h \cdot r}{R_1^2} + 13,0 \frac{2b \cdot r}{R_1^2} - 284,0 \frac{2h \cdot b \cdot r}{R_1^3}. \quad (15)$$

Полученные формулы (12–15) можно использовать для расчетов формоизменения металла для проектирования калибровок тавровых профилей.

Анализируя полученные выражения определили, что при обжатии круглых заготовок в открытом тавровом калибре коэффициент вытяжки возрастает с увеличением отношений $\frac{2r}{h}$; $\frac{a}{r}$ и с уменьшением $-\frac{2R_1}{h_1}$.

При обжатии круглых заготовок в трехвалковом калибре, анализ полученных зависимостей показал (выявил), что коэффициент вытяжки возрастает с уменьшением отношений $\frac{h}{R_1}$; $\frac{b}{R_1}$; и с увеличением, $\frac{2r}{R_1}$, а коэффициент уширения стенки уменьшается с увеличением $\frac{h}{R_1}$; $\frac{b}{R_1}$; $\frac{2r}{R_1}$. Коэффициент утяжки полок возрастает с уменьшением отношений $\frac{h}{R_1}$; $\frac{2r}{R_1}$ и увеличением $-\frac{b}{R_1}$.

ВЫВОДЫ

В результате обработки экспериментальных данных получили аналитические зависимости для определения коэффициента вытяжки, коэффициента уширения стенки и коэффициента утяжки полок, которые можно использовать при расчете калибровок для тавровых профилей на малоклетевых станах

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка : справочное издание в 6 т. Т. 1 / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев; под. ред. Б. М. Илюковича. – Днепропетровск : Дніпро-ВАЛ, 2002. – 518 с.
2. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка : справочное издание в 6 т. Т. 3 / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, В. П. Капелюшный; под. ред. Б. М. Илюковича. – Днепропетровск : Дніпро-ВАЛ, 2003. – 429 с.
3. Илюкович Б. М. Прокатка тавровых профилей в открытых калибрах / Б. М. Илюкович. – М. : Металлургия, 1961. – 79 с.
4. Дослідження формозміння при прокатці таврових профілів з масивною стінкою / [Є. В. Галицький, М. К. Измайлова, Р. Я. Романюк, М. В. Цабенко] // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2010. – Вип. 1(14). – С. 64–69.
5. А. с. 1117095 СССР, МКІР³, В21В 13/10. Кассета вертикального вала универсальной клетки / В. Д. Есипов, Б. М. Илюкович, В. П. Капелюшный, П. С. Данилов, Н. Е. Нехаев (СССР). – 3605609/22 – 02; заявл. 15.06.83; опубл. 07. 10. 84, Бюл. № 37.

Капелюшный В. П. – канд. техн. наук, доц. ДГТУ;

Нехаев Н. Е. – канд. техн. наук, доц. ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,
г. Днепродзержинск.

E-mail: r22roma@mail.ru