

УДК 621.771.01

Нехаев Н. Е.
Измайлова М. К.**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ П-ОБРАЗНЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ**

Прокатка в четырехвалковых калибрах привлекает внимание специалистов возможностью получения более сложных профилей повышенной точности, а также возможностью прокатки труднодеформируемых металлов и сплавов. Четырехвалковые калибры (ЧВК) удачно сочетаются с обычными двухвалковыми. Различные их комбинации в схемах прокатки позволяют эффективно вести процесс деформации металла и достигать высоких результатов. Благоприятные условия деформации (всестороннее обжатие, большая вытяжка) в ЧВК дают возможность уменьшить число фасонных калибров на станах в полтора-два раза по сравнению с двухвалковыми. Прокатка в ЧВК позволяет получать профили высокой точности по толщине и ширине одновременно.

Анализ сортамента фасонных профилей [1] показывает, что около 15 % профилей целесообразно получать прокаткой в клетях с четырехвалковым калибром. Данные о практическом применении ЧВК свидетельствуют о возможности и целесообразности их использования при горячей прокатке целого ряда сложных профилей П-образной формы, балочной, тавровой, крестообразной и других форм [1, 2].

Однако основной трудностью при прокатке фасонных профилей в ЧВК является обеспечение качественного заполнения калибра вблизи разъемов валков. Проблема качественного заполнения ЧВК решается путем теоретических и экспериментальных исследований формоизменения металла в калибрах [2–5].

Целью работы является экспериментальное исследование и получение формул для определения формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке П-образных профилей в четырехвалковых калибрах (рис. 1).

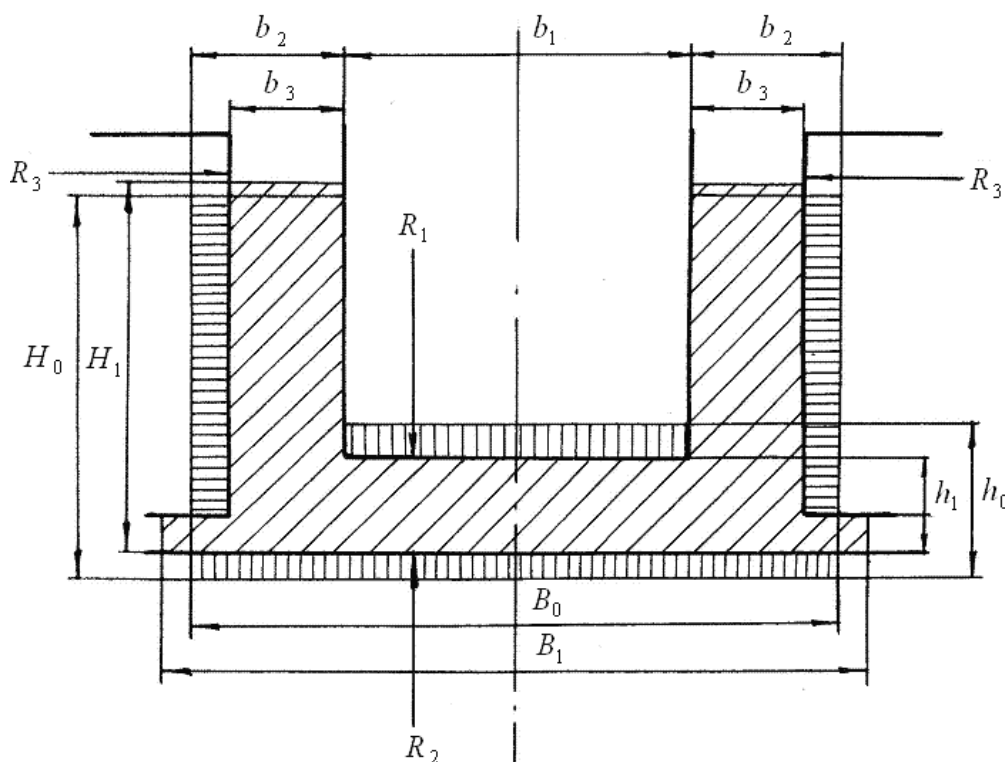


Рис. 1. Схема очага деформации П-образного профиля в четырехвалковом калибре

Экспериментальные исследования проведены на полупромышленном стане 300, оборудованном четырехвалковой клетью. Четырехвалковый калибр создавался двумя приводными горизонтальными валками диаметром 320 мм и двумя холостыми вертикальными валками диаметром 90 мм. Материал валков – сталь 45. Привод стана – от электродвигателя мощностью 120 кВт и числом оборотов 734 об/мин. Передаточное число редуктора – 23,34.

Образцы изготавливали из стали марки Ст 3 длиной 300 мм и нагревали в электропечи до температуры 1100 °С. На поверхности образцов для определения коэффициента вытяжки наносили риски на расстоянии 100 мм друг от друга.

Усилие при прокатке на горизонтальных и вертикальных валках измерялось с помощью месдоз мембранного типа, изготовленных из стали ШХ15 и установленными под нажимными винтами клетки и кассеты. Момент прокатки на горизонтальных валках измерялся с помощью кольцевых токосъемных устройств со скользящими контактами.

Предполагалось, что в производственных условиях при прокатке П-образных профилей формоизменение металла и энергосиловые параметры в основном зависят от геометрических параметров задаваемой полосы и размеров четырехвалкового калибра, а условия трения близки к исследуемым.

Поэтому в качестве независимых переменных приняты (рис. 1) геометрические размеры очага деформации и калибра: R_1 , R_3 – радиус горизонтальных и вертикальных валков; H_0 , H_1 – исходная и конечная высота полки; h_0 , h_1 – начальная и конечная толщина стенки; b_1 – ширина стенки; b_2, b_3 – ширина полки до и после прокатки.

На основании анализа существующих калибровок П-образных профилей, а также в соответствии с конструктивными характеристиками полупромышленного стана 300 и условиями осуществления процесса прокатки, значения размерных параметров ограничены пределами:

$$\left. \begin{aligned} 8 \text{ мм} \leq h_0 \leq 13 \text{ мм}; 4,4 \text{ мм} \leq h_1 \leq 10 \text{ мм}; \\ 21,2 \text{ мм} \leq H_0 \leq 35,1 \text{ мм}; 20,8 \text{ мм} \leq b_1 \leq 38,4 \text{ мм}; \\ 7,2 \text{ мм} \leq b_2 \leq 13,1 \text{ мм}; 4 \text{ мм} \leq b_3 \leq 10,5 \text{ мм}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В качестве безразмерных относительных параметров приняты следующие величины:

$$m_1 = \frac{b_1}{R_1}; m_2 = \frac{b_2}{R_3}; m_3 = \frac{h_0}{R_1}; m_4 = \frac{h_0}{h_1}; m_5 = \frac{b_2}{b_3}; m_6 = \frac{h_0}{R_3}. \quad (2)$$

С учетом выражений (1) и (2) и значений радиусов валков $R_1 = 160$ мм, $R_3 = 45$ мм находим пределы изменения параметров:

$$\left. \begin{aligned} 0,13 \leq m_1 \leq 0,24; 0,16 \leq m_2 \leq 0,29; 0,05 \leq m_3 \leq 0,081; \\ 1,3 \leq m_4 \leq 1,8; 1,25 \leq m_5 \leq 1,8; 0,47 \leq m_6 \leq 0,78. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При проведении опытов использовалась теория планирования эксперимента.

Качественный анализ и приближенные оценки зависимостей коэффициентов формоизменения от различных факторов показали, что в качестве плана эксперимента может быть использован дробный факторный эксперимент.

Число экспериментальных точек равно: $N = 2^{6-1} = 32$. При этом матрица планирования задана с генерирующим соотношением $x_6 = x_1 x_2 x_3 x_4 x_5$.

Размеры образцов до и после прокатки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры образцов до и после прокатки

№	Размеры до прокатки, мм					Размеры после прокатки, мм				
	b_1	b_2	h_0	H_0	B_0	b_3	h_1	H_1	B_1	l_1
1	38,4	13,1	13	35,1	64,6	7,3	7,2	34,8	65,9	172
2	20,8	13,1	13	21,2	47	7,3	7,2	21,8	48,6	162
3	38,4	7,2	13	21,2	52,8	4	7,2	21,9	55,5	173
4	20,8	7,2	13	35,1	35,2	4	7,2	35,8	36,8	168
5	38,4	13,1	8	21,2	64,6	7,3	4,4	22,1	64,9	163
6	20,8	13,1	8	35,1	47	7,3	4,4	36,2	47,5	171
7	38,4	7,2	8	35,1	52,8	4	4,4	36,3	55,3	172
8	20,8	7,2	8	21,2	35,2	4	4,4	22,6	37,4	166
9	38,4	13,1	13	21,2	64,6	7,3	10	23,3	63,6	141
10	20,8	13,1	13	35,1	47	7,3	10	36,5	46,2	157
11	38,4	7,2	13	35,1	52,8	4	10	37,8	52,6	147
12	20,8	7,2	13	21,2	35,2	4	10	23	35,6	142
13	38,4	13,1	8	35,1	64,6	7,3	6,2	36,7	62,8	165
14	20,8	13,1	8	21,2	47	7,3	6,2	23,5	45,5	148
15	38,4	7,2	8	21,2	52,8	4	6,2	24,6	53,1	137
16	20,8	7,2	8	35,1	35,2	4	6,2	37,6	34,4	162
17	38,4	13,1	13	21,2	64,6	10,5	7,2	21	68,1	145
18	20,8	13,1	13	35,1	47	10,5	7,2	34,4	51,3	135
19	38,4	7,2	13	35,1	52,8	5,8	7,2	33,5	59,7	144
20	20,8	7,2	13	21,2	35,2	5,8	7,2	20,5	41,4	146
21	38,4	13,1	8	35,1	64,6	10,5	4,4	34,8	66	132
22	20,8	13,1	8	21,2	47	10,5	4,4	21,3	49,4	130
23	38,4	7,2	8	21,2	52,8	5,8	4,4	20,6	56,1	146
24	20,8	7,2	8	35,1	35,2	5,8	4,4	34,5	39,1	132
25	38,4	13,1	13	35,1	64,6	10,5	10	34,4	65,2	128
26	20,8	13,1	13	21,2	47	10,5	10	21,2	47,6	124
27	38,4	7,2	13	21,2	52,8	5,8	10	21,1	53,6	130
28	20,8	7,2	13	35,1	35,2	5,8	10	34,4	36,2	129
29	38,4	13,1	8	21,2	64,6	10,5	6,2	20,9	64,1	128
30	20,8	13,1	8	35,1	47	10,5	6,2	34,7	47,4	125
31	38,4	7,2	8	35,1	52,8	5,8	6,2	34,9	53,4	128
32	20,8	7,2	8	21,2	35,2	5,8	6,2	21	36,2	127

В качестве функций отклика приняты: коэффициент вытяжки $\lambda = \frac{l_1}{l_0}$, коэффициент утяжки полок по высоте $\delta = \frac{H_1}{H_0}$, коэффициент уширения стенки $\beta = \frac{B_1}{B_0}$, приведенное усилие прокатки для горизонтальных приводных валков $\bar{P}_2 = \frac{P_2}{S_0 \sigma_s}$, приведенное усилие прокатки для вертикальных неприводных валков $\bar{P}_6 = \frac{P_6}{S_0 \sigma_s}$, приведенный момент прокатки $\bar{M}_{np} = \frac{M_{np}}{S_0 R_1 \sigma_s}$, где l_0, l_1 – соответственно расстояние между рисками на поверхности полосы

до и после прокатки; P_2 – усилие прокатки, действующее на горизонтальный валок; P_6 – усилие прокатки, действующее на вертикальный валок; M_{np} – момент прокатки; S_0 – площадь сечения исходного профиля; σ_s – сопротивление деформации металла. Сопротивление деформации стали Ст 3 для температуры 1100 °С и средней скорости деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$ равно $\sigma_s = 57 \text{ МПа}$.

Значения коэффициентов деформации и энергосиловых параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов деформации и энергосиловых параметров

№	Коэффициенты деформации			Энергосиловые параметры					
	$\lambda = \frac{l_1}{l_0}$	$\delta = \frac{H_1}{H_0}$	$\beta = \frac{B_1}{B_0}$	P_2 , кН	P_6 , кН	M_{np} , кНм	\bar{P}_2	\bar{P}_6	\bar{M}_{np}
1	1,720	0,991	1,020	482,3	104,7	26,6	5,964	1,295	2,056
2	1,620	1,028	1,034	198,3	46,8	11,4	4,213	0,994	1,514
3	1,730	1,033	1,051	380,0	59,1	18,5	8,287	1,289	2,522
4	1,680	1,020	1,045	228,0	87,5	14,9	5,156	1,979	2,106
5	1,630	1,042	1,005	329,5	64,1	14,4	6,701	1,304	1,830
6	1,710	1,031	1,011	238,1	82,6	13,9	3,846	1,334	1,403
7	1,720	1,034	1,047	351,8	99,3	17,5	7,595	2,144	2,361
8	1,660	1,066	1,063	129,1	45,5	7,0	4,802	1,692	1,627
9	1,410	1,099	0,985	198,2	53,9	11,1	3,297	0,897	1,154
10	1,570	1,040	0,983	129,1	63,7	12,0	1,903	0,939	1,106
11	1,470	1,077	0,996	150,1	72,8	13,4	2,621	1,271	1,463
12	1,420	1,085	1,011	97,2	48,1	6,9	2,962	1,466	1,314
13	1,650	1,046	0,972	120,9	82,3	17,8	1,729	1,177	1,591
14	1,480	1,108	0,968	80,6	49,2	7,3	1,959	1,196	1,109
15	1,370	1,160	1,006	128,9	44,0	8,2	3,692	1,260	1,468
16	1,620	1,071	0,977	76,0	73,5	7,6	1,985	1,919	1,240
17	1,450	0,991	1,054	330,0	28,5	10,8	5,490	0,474	1,123
18	1,350	0,980	1,091	212,5	37,3	12,2	3,133	0,550	1,124
19	1,440	0,954	1,131	376,1	42,1	13,3	6,568	0,735	1,452
20	1,460	0,967	1,176	169,0	20,5	8,8	5,150	0,625	1,676
21	1,320	0,991	1,022	308,8	34,2	14,4	4,416	0,489	1,287
22	1,300	1,005	1,051	139,7	23,6	7,0	3,395	0,574	1,063
23	1,460	0,972	1,063	298,0	24,7	10,2	8,536	0,708	1,826
24	1,320	0,983	1,111	153,2	34,1	9,9	4,001	0,890	1,616
25	1,280	0,980	1,009	170,2	31,5	9,6	2,105	0,390	0,742
26	1,240	1,000	1,013	86,0	16,5	5,5	1,827	0,351	0,730
27	1,300	0,995	1,015	98,3	10,4	5,8	2,144	0,227	0,791
28	1,290	0,980	1,028	80,0	35,4	6,1	1,809	0,800	0,862
29	1,280	0,986	0,992	120,6	18,6	6,0	2,453	0,378	0,763
30	1,250	0,989	1,009	91,7	29,6	7,3	1,481	0,478	0,737
31	1,280	0,994	1,011	126,8	29,6	8,1	2,737	0,639	1,093
32	1,270	0,991	1,028	62,3	11,4	3,5	2,317	0,424	0,814

Результаты эксперимента (табл. 2) обработаны с использованием стандартного пакета прикладных программ «Статистика» и получены следующие формулы для определения коэффициентов формоизменения и энергосиловых параметров:

$$\lambda = 0,205 + 0,153m_1 - 0,111m_2 + 0,234m_3 + 0,288m_4 + 0,471m_5 + 0,119m_6; \quad (4)$$

коэффициент корреляции $R = 0,93$; средняя ошибка аппроксимации равна 3,39 %; среднее квадратичное отклонение $\sigma = 0,071$;

$$\delta = 1,005 - 0,126m_1 - 0,258m_2 + 0,624m_3 + 0,117m_4 - 0,0714m_5 - 0,0101m_6; \quad (5)$$

коэффициент корреляции $R = 0,91$; средняя ошибка аппроксимации равна 1,38 %; среднее квадратичное отклонение $\sigma = 0,02$;

$$\beta = 1,002 + 0,0015m_1 - 0,036m_2 - 0,501m_3 - 0,0617m_4 + 0,133m_5 - 0,074m_6; \quad (6)$$

коэффициент корреляции $R = 0,902$; средняя ошибка аппроксимации равна 1,51 %; среднее квадратичное отклонение $\sigma = 0,023$;

$$\bar{P}_2 = -6,774 + 13,861m_1 - 7,845m_2 + 2,250m_3 + 6,072m_4 + 1,033m_5 - 2,059m_6; \quad (7)$$

коэффициент корреляции $R = 0,94$; средняя ошибка аппроксимации равна 17,9 %; среднее квадратичное отклонение $\sigma = 0,785$;

$$\bar{P}_6 = -1,331 - 0,873m_1 - 2,507m_2 - 4,633m_3 + 0,395m_4 + 1,521m_5 + 0,642m_6; \quad (8)$$

коэффициент корреляции $R = 0,95$; средняя ошибка аппроксимации равна 17,5 %; среднее квадратичное отклонение $\sigma = 0,173$;

$$\bar{M}_{np} = -1,788 + 1,976m_1 - 2,338m_2 - 0,138m_3 + 1,159m_4 + 0,923m_5 + 0,186m_6; \quad (9)$$

коэффициент корреляции $R = 0,93$; средняя ошибка аппроксимации равна 10,4 %; среднее квадратичное отклонение $\sigma = 0,193$.

Анализ формулы (4) показал, что наибольшее влияние на коэффициент вытяжки $\lambda = l_1/l_0$ оказывает параметр $m_5 = b_2/b_3$, затем – $m_4 = h_0/h_1$ и $m_6 = h_0/R_3$, менее значимы факторы – $m_1 = b_1/R_1$; $m_2 = b_2/R_3$; $m_3 = h_0/R_1$.

Коэффициент утяжки полок по высоте $\delta = \frac{H_1}{H_0}$ (формула (5)) зависит больше всего от параметров m_4 , m_5 и m_2 , менее значимы факторы m_3 , m_1 и m_6 .

Коэффициент уширения стенки $\beta = \frac{B_1}{B_0}$ (формула (6)) зависит больше всего от параметров m_5 , m_4 и m_6 , менее значимы факторы m_3 , m_2 и m_1 .

Приведенное усилие прокатки для горизонтальных приводных валков $\bar{P}_2 = \frac{P_2}{S_0\sigma_s}$ (формула (7)) зависит в большей степени от параметров m_4 , m_1 , m_2 и m_6 , менее значимы параметры m_5 и m_3 .

Приведенное усилие прокатки для вертикальных неприводных валков $\bar{P}_6 = \frac{P_6}{S_0 \sigma_s}$ (формула (8)) зависит в большей степени от параметров m_5 , m_2 , m_4 , m_6 , m_3 , менее значим параметр m_1 .

Приведенный момент прокатки $\bar{M}_{np} = \frac{M_{np}}{S_0 R_1 \sigma_s}$ существенно зависит от параметров m_4 , m_5 , m_2 и m_1 , менее значимы параметры m_6 и m_3 .

Статистический анализ показывает достаточно высокое соответствие опытных и расчетных данных. Таким образом, полученные формулы можно рекомендовать для расчетов коэффициентов формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке П-образных профилей в четырехвалковых калибрах.

ВЫВОДЫ

На основании экспериментальных данных получены формулы для определения коэффициентов формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке П-образных профилей в четырехвалковых калибрах. Статистический анализ показывает достаточно высокое соответствие опытных и расчетных данных в условиях проведенного эксперимента. Полученные формулы могут быть использованы при разработке калибровки П-образных профилей с использованием четырехвалковых калибров в производственных условиях Омутнинского, Череповецкого, Ижевского и других сталепрокатных заводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка : справочное издание в 6-ти томах / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев; под ред. Б. М. Илюковича. – Днепропетровск : РИА «Днепр-ВАЛ», 2002. – Т. 1. – 518 с.
2. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка : справочное издание в 6 томах / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, В. П. Капелюшный; под ред. Илюковича Б. М. – Днепропетровск : РИА «Днепр-ВАЛ», 2004. – Т. 5. – 481 с.
3. Огинский И. К. Оборудование и технология на основе многовалковых калибров для производства простых, фасонных и специальных профилей / И. К. Огинский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 8–9. – С. 231–234.
4. Илюкович Б. М. Определение формоизменения при прокатке фланцевых профилей в четырехвалковых калибрах / Б. М. Илюкович, М. К. Измайлова, Н. Е. Нехаев // *Изв. вуз. Черная металлургия*. – 1991. – № 1. – С. 45–47.
5. Измайлова М. К. Построение кинематически возможного поля скоростей при прокатке фланцевых профилей в четырёхвалковых калибрах / М. К. Измайлова, Н. Е. Нехаев, В. В. Степчук // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 2 (21). – С. 90–96.

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

Измайлова М. К. – канд. техн. наук, доц. ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,
г. Днепродзержинск.

E-mail: omd@dstu.dp.ua