

УДК 621.771.01

Измайлова М. К.
Нехаев Н. Е.**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ
КЛИНОВИДНЫХ ПРОФИЛЕЙ**

Одним из наиболее широких классов сложных фасонных профилей являются клиновидные и профили с клиновидными участками, а также полособульбовые. При прокатке этих профилей наблюдается искривление полосы в горизонтальной плоскости (серпение) и скручивание. Это связано с неравномерностью деформации правой и левой частей профиля [1, 2]. На серпение и скручивание заметно влияет разница коэффициентов высотной деформации, различие температуры металла в тонкой и толстой частях профиля, неравномерность износа калибров и неодинаковые обжатия и скорость валков.

Кроме того, формирование в клиновидном калибре из заготовки круглого сечения сопровождается значительно меньшим серповидным изгибом, чем при использовании заготовки прямоугольной формы [1].

При калибровке клиновидных профилей существенное значение имеет определение формоизменения в первых по ходу прокатки фасонных калибрах, в которых осуществляется первоначальное формирование профиля и наиболее сильно проявляется серповидный изгиб. От точности расчетов зависит число фасонных калибров и эффективность калибровки.

Возможность интенсивного формирования клиновидного подката из исходных заготовок простого сечения позволяет уменьшить число фасонных формирующих калибров, снизить энергосиловые параметры деформации, обеспечить стабильность и прямолинейность раскатов. Это особенно важно для современных прокатных станов с последовательным расположением клетей и принципом непрерывной прокатки.

Результаты экспериментальных исследований формоизменения при прокатке клиновидных профилей из заготовки прямоугольного сечения на стане 350 представлены в работе [3].

Целью данной работы являются экспериментальные исследования формоизменения при прокатке клиновидных профилей из заготовок прямоугольного и круглого сечения на стане 400 с более широким диапазоном изменения варьируемых параметров.

С этой целью проведен планируемый эксперимент на полупромышленном стане 400 кафедры ОМД Днепропетровского государственного технического университета (ДГТУ). Нагрев заготовок из стали марки Ст. 3 производился до температуры 1100 °С в электрической печи. Скорость прокатки 0,645 м/с. Диаметр валков 350 мм. Материал прокатных валков сталь 45Х. Длина образцов 300 мм. Мощность электродвигателя 320 кВт.

Для предотвращения серповидного изгиба использовалась разработанная в НИИ «Профиль» технология прокатки с применением сквозных линеек для удержания раската в калибрах [1]. Калибры с углом клиновидности α 10° и 20° образовывались двумя горизонтальными валками, сквозная линейка находилась в очаге между прокатными валками. Сквозные линейки обеспечивали стабильность положения металла в калибрах и абсолютную прямолинейность проката при всех режимах крайне неравномерной деформации.

При исследовании (рис. 1) в качестве переменных были приняты следующие безразмерные величины, характеризующие форму образца и калибра:

– для прямоугольных заготовок:

$$m_1 = \frac{H_0}{H_1}; m_2 = \operatorname{tg} \alpha; m_3 = \frac{H_0}{R}; m_4 = \frac{H_0}{B_0} \quad (1)$$

с областью изменения:

$$m_1 = 1,1 \dots 1,5; m_2 = 0,176 \dots 0,364; m_3 = 0,2 \dots 0,4; m_4 = 0,75 \dots 1,2; \quad (2)$$

– для круглых заготовок:

$$m_1 = \frac{d}{H_1}; m_2 = \operatorname{tg} \alpha; m_3 = \frac{d}{R} \quad (3)$$

с областью изменения:

$$m_1 = 1,1 \dots 1,5; m_2 = 0,176 \dots 0,364; m_3 = 0,17 \dots 0,34, \quad (4)$$

где H_0 – высота исходной заготовки;

H_1 – высота калибра;

h_1 – минимальная высота калибра;

B_0 – ширина исходной прямоугольной заготовки;

d – диаметр исходной круглой заготовки;

R – радиус горизонтальных валков.

В соответствии с конструктивными характеристиками полупромышленного стана 400, а также реальными условиями осуществления процесса прокатки, значения размерных величин были ограничены следующими пределами (мм):

$$H_0 = 30 \dots 50; H_1 = 20 \dots 45,5; B_0 = 25 \dots 66; d = 30 \dots 60; h_1 = 5 \dots 28. \quad (5)$$

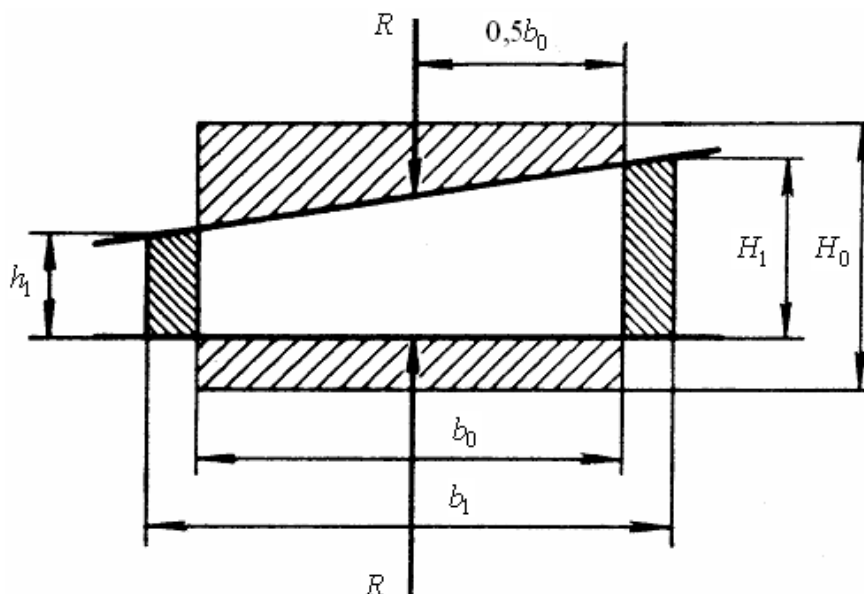


Рис. 1. Схема обжатия полосы при прокатке клиновидных профилей

При планировании эксперимента в качестве модели для неизвестных функций: коэффициента вытяжки $\lambda = \frac{L_1}{L_0}$ и коэффициента уширения $\beta = \frac{B_1}{B_0}$ – принята линейная модель с взаимодействием факторов [4]. Для прямоугольных заготовок использовался полный факторный эксперимент 2^4 с количеством опытов 16 (табл. 1), а для круглых заготовок – полный факторный эксперимент 2^3 с количеством опытов 8 (табл. 2).

Кодированные переменные $-1 \leq x_i \leq +1$ ($i=1, 2, 3, 4$) связаны с параметрами m_i следующими формулами:

– для прямоугольных заготовок:

$$x_1 = 5m_1 - 6,5; \quad x_2 = 10,688m_2 - 2,873; \quad x_3 = 10m_3 - 5; \quad x_4 = 4,444m_4 - 4,333; \quad (6)$$

– для круглых заготовок:

$$x_1 = 5m_1 - 6,5; \quad x_2 = 10,698m_2 - 2,873; \quad x_3 = 11,76m_3 - 2,999. \quad (7)$$

Опытные и расчетные данные по прокатке клиновидных профилей из заготовки прямоугольного сечения приведены в табл. 3, а из заготовки круглого сечения в табл. 4.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента для прямоугольных образцов

№	x_1	x_2	x_3	x_4	$m_1 = \frac{H_0}{H_1}$	$m_2 = \operatorname{tg} \alpha$	$m_3 = \frac{H_0}{R}$	$m_4 = \frac{H_0}{B_0}$
1	-1	-1	-1	-1	1,1	0,176	0,2	0,75
2	+1	-1	-1	-1	1,5	0,176	0,2	0,75
3	-1	+1	-1	-1	1,1	0,364	0,2	0,75
4	+1	+1	-1	-1	1,5	0,364	0,2	0,75
5	-1	-1	+1	-1	1,1	0,176	0,4	0,75
6	+1	-1	+1	-1	1,5	0,176	0,4	0,75
7	-1	+1	+1	-1	1,1	0,364	0,4	0,75
8	+1	+1	+1	-1	1,5	0,364	0,4	0,75
9	-1	-1	-1	+1	1,1	0,176	0,2	1,2
10	+1	-1	-1	+1	1,5	0,176	0,2	1,2
11	-1	+1	-1	+1	1,1	0,364	0,2	1,2
12	+1	+1	-1	+1	1,5	0,364	0,2	1,2
13	-1	-1	+1	+1	1,1	0,176	0,4	1,2
14	+1	-1	+1	+1	1,5	0,176	0,4	1,2
15	-1	+1	+1	+1	1,1	0,364	0,4	1,2
16	+1	+1	+1	+1	1,5	0,364	0,4	1,2

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента для круглых образцов

№	x_1	x_2	x_3	$m_1 = \frac{d}{H_1}$	$m_2 = \operatorname{tg} \alpha$	$m_3 = \frac{d}{R}$
1	-1	-1	-1	1,1	0,176	0,17
2	+1	-1	-1	1,5	0,176	0,17
3	-1	+1	-1	1,1	0,364	0,17
4	+1	+1	-1	1,5	0,364	0,17
5	-1	-1	+1	1,1	0,176	0,34
6	+1	-1	+1	1,5	0,176	0,34
7	-1	+1	+1	1,1	0,364	0,34
8	+1	+1	+1	1,5	0,364	0,34

Таблица 3

Опытные и расчетные данные по прокатке клиновидных профилей
из заготовки прямоугольного сечения

№ п/п	Размеры образцов и калибров, мм						Коэффициент вытяжки		Коэффициент уширения	
	α °	H_0	B_0	H_1	h_1	B_1	$\lambda_{экс}$	$\lambda_{расч}$	$\beta_{экс}$	$\beta_{расч}$
1	10	30	40	27,3	17,3	43,4	1,28	1,26	1,09	1,11
2	10	30	40	20	10	47,6	1,17	1,22	1,19	1,18
3	20	30	40	27,3	12,5	49,7	1,15	1,2	1,24	1,21
4	20	30	40	20	5	51,5	1,44	1,39	1,29	1,31
5	10	50	66	45,5	15,5	81,4	1,48	1,35	1,23	1,17
6	10	50	66	33	28	71,1	1,46	1,29	1,08	1,14
7	20	50	66	45,5	14	79,1	1,15	1,27	1,2	1,28
8	20	50	66	33	5	89,1	1,54	1,45	1,35	1,29
9	10	30	25	27,3	17,3	26,4	1,06	1,14	1,06	1,09
10	10	30	25	20	10	35,5	1,28	1,22	1,42	1,37
11	20	30	25	27,3	12,5	29,5	1,1	1,02	1,18	1,15
12	20	30	25	20	5	36	1,23	1,33	1,44	1,47
13	10	50	42	45,5	28	44,3	1,11	1,22	1,05	1,05
14	10	50	42	33	15,5	52,3	1,37	1,29	1,25	1,24
15	20	50	42	45,5	14	48,5	1,16	1,09	1,15	1,13
16	20	50	42	33	5	57,2	1,31	1,39	1,36	1,36

Таблица 4

Опытные и расчетные данные по прокатке клиновидных профилей из заготовки круглого сечения

№ п/п	Размеры образцов и калибров, мм					Коэффициент вытяжки		Коэффициент уширения	
	α °	d	H_1	h_1	B_1	$\lambda_{экс}$	$\lambda_{расч}$	$\beta_{экс}$	$\beta_{расч}$
1	10	30	27,3	17,3	31,0	1,05	1,07	1,03	1,05
2	10	30	20	10	41,6	1,23	1,25	1,39	1,37
3	20	30	27,3	12,5	33,4	1,08	1,07	1,11	1,09
4	20	30	20	5	39,5	1,19	1,21	1,32	1,34
5	10	60	54,5	36,5	62,4	1,07	1,06	1,04	1,02
6	10	60	40	22	76,7	1,23	1,25	1,19	1,21
7	20	60	54,5	19	65,6	1,11	1,13	1,09	1,11
8	20	60	40	5	76,3	1,32	1,31	1,27	1,25

В результате обработки планируемого эксперимента (табл. 3) получены формулы для расчета коэффициентов вытяжки λ и уширения β в зависимости от переменных m_i :

– для прямоугольной заготовки:

$$\lambda = 2,59 - 1,15m_1 - 3,08m_2 + 0,710m_3 - 0,916m_4 + 3,06m_1m_2 - 0,125m_1m_3 + 0,694m_1m_4 - 0,532m_2m_3 - 0,650m_2m_4 - 0,0555m_3m_4; \quad (8)$$

$$\beta = 1,47 - 0,600m_1 + 0,152m_2 + 2,24m_3 - 1,10m_4 + 0,499m_1m_2 - 1,16m_1m_3 + 1,21m_1m_4 + 0,465m_2m_3 - 0,384m_2m_4 - 1,03m_3m_4; \quad (9)$$

– для круглой заготовки:

$$\lambda = 0,812 + 0,298m_1 - 0,226m_2 - 1,091m_3 - 0,133m_1m_2 + 0,588m_1m_3 + 2,19m_2m_3; \quad (10)$$

$$\beta = -0,240 + 1,23m_1 + 0,745m_2 + 1,40m_3 - 0,798m_1m_2 - 1,76m_1m_3 + 1,88m_2m_3. \quad (11)$$

Средние ошибки аппроксимации для зависимостей (8) и (9) равны соответственно 6,6 % и 2,6 %, а для зависимостей (10) и (11) – 1,3 % и 1,9 %

Анализ формулы (8) показал, что наибольшее влияние на коэффициент вытяжки λ оказывает параметр $m_1 = \frac{H_0}{H_1}$, затем – $m_4 = \frac{H_0}{B_0}$, $m_3 = \frac{H_0}{R}$ и наименьшее – параметр

$m_2 = \operatorname{tg}\alpha$, характеризующий клиновидность полосы. При этом с увеличением параметров m_1 и m_3 коэффициент вытяжки λ возрастает, а с увеличением параметров m_2 и m_4 – уменьшается. Из формулы (9) следует, что коэффициент уширения β зависит больше всего, также как и коэффициент вытяжки λ , от параметра m_1 , затем – от m_2 и m_3 , и менее всего – от m_4 . При этом с увеличением параметров m_1 , m_3 и m_4 коэффициент уширения β возрастает, а с ростом m_2 – уменьшается.

Аналогичный характер зависимости коэффициентов формоизменения и для прокатки круглых заготовок. Наибольшее влияние на коэффициент вытяжки оказывает параметр $m_1 = \frac{d}{H_1}$, затем $m_2 = \operatorname{tg}\alpha$, и наименьшее $m_3 = \frac{d}{R}$. При этом коэффициент вытяжки увеличивается с ростом параметров m_1 , m_2 и m_3 . Наибольшее влияние на коэффициент уширения оказывает параметр $m_1 = \frac{d}{H_1}$, затем $m_3 = \frac{d}{R}$, и наименьшее $m_2 = \operatorname{tg}\alpha$. При этом коэффициент уширения увеличивается с ростом параметров m_1 , m_2 и уменьшается с увеличением m_3 .

Статистический анализ показывает достаточно высокое соответствие опытных и расчетных данных. Таким образом, полученные формулы можно рекомендовать для расчетов коэффициентов формоизменения при прокатке клиновидных профилей из прямоугольных и круглых заготовок.

ВЫВОДЫ

На основании экспериментальных данных получены формулы для определения коэффициентов формоизменения при прокатке клиновидных профилей из прямоугольных и круглых заготовок. Статистический анализ показывает достаточно высокое соответствие опытных и расчетных данных в условиях проведенного эксперимента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Илюкович Б. М. *Прокатка и калибровка : справ. изд. в 6-ти томах. Т. 2 / Б. М. Илюкович. – Днепропетровск : РИА «Днепр-ВАЛ», 2003. – 569 с.*
2. Илюкович Б. М. *Прокатка и калибровка : справ. изд. в 6-ти томах. Т. 1 / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев; под. ред. Б. М. Илюковича. – Днепропетровск : РИА «Днепр-ВАЛ», 2002. – 518 с.*
3. *Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке клиновидных профилей / Б. М. Илюкович, М. К. Измайлова, С. В. Симоненко, И. М. Морской, А. Ю. Журавлев // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1988. – № 5. – С. 65–67.*
4. *Хартман К. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / [К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер и др.]. – М. : Мир, 1977. – 552 с.*

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

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

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск.

E-mail: m_izmailova@bk.ru; omd@dstu.dp.ua

Статья поступила в редакцию 10.10.2012 г.