

В. И. П у н и н

**АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПОЛОСЫ  
В УСЛОВИЯХ ПРОФИЛЕГИБКИ**

*Рассмотрены вопросы утонения заготовки при гибке полосы с фиксированными и свободными радиусами. Приведен расчет геометрических параметров при профилировании.*

E-mail: mt13@bmstu.ru

**Ключевые слова:** процесс гибки, радиус кривизны, валки, расчет калибров.

В производстве стальных гнутых профилей такой важный технологический фактор, как утонение металла, сильно влияет на формоизменение заготовки, что вынуждает технологов вносить значительные корректировки и выполнять дополнительные расчеты для определения исходной ширины заготовки, учитывая поправки на изогнутые сегменты профильных деталей. В известных методиках расчета коэффициентов утонения не учитываются реальные условия, в которых будет осуществляться операция валковой гибки. Здесь особое внимание следует обратить на особенности сопряжения инструмента с материалом. Например, неточный учет утонения полосы оставляет зазор между полосой и нижним валком, который устраняется лишь на последнем — калибрующем проходе. С каждым последующим проходом радиус кривизны заготовки постепенно уменьшается до заданного значения. В последнем калибре происходит наибольший контакт полосы с верхним и нижним валками. Оценим изменение размеров в предпоследних калибрах, когда внутренний радиус заготовки фиксирован ( $R_2 = \text{const}$ ), а наружный ( $R_1$ ) свободно изменяется.

Согласно методике [1] относительная тангенциальная деформация для зоны растяжения

$$\varepsilon_{\theta_{\text{нар}}} = \frac{R_1 + (R_1 - \rho_{\text{н}}) \varepsilon_{r_{\text{нар}}} - \rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}}} = \frac{-\varepsilon_{r_{\text{нар}}}}{\varepsilon_{r_{\text{нар}}} + 1}.$$

Отсюда относительная радиальная деформация для зоны растяжения

$$\varepsilon_{r_{\text{нар}}} = \frac{\sqrt{4Z_1 - 3Z_1^2} - (2 - Z_1)}{2(1 - Z_1)},$$

где  $Z_1 = \frac{R_2}{\rho_{\text{н}}}$  — положение нейтральной поверхности; тогда

$$\varepsilon_{\theta_{\text{нар}}} = \frac{-\varepsilon_{r_{\text{нар}}}}{1 + \varepsilon_{r_{\text{нар}}}} = \frac{(2 - Z_1) - \sqrt{4Z_1 - 3Z_1^2}}{\sqrt{4Z_1 - 3Z_1^2} - Z_1}.$$

Для случая гибки с  $R_2 = \text{const}$  относительная тангенциальная деформация для зоны растяжения

$$\varepsilon_{\theta_{\text{ВН}}} = \frac{\rho_{\text{Н}} - R_2}{\rho_{\text{Н}}} = \frac{Z_1 - \frac{R_2}{R_1}}{Z_1},$$

откуда

$$\varepsilon_{r_{\text{ВН}}} = \frac{-\varepsilon_{\theta_{\text{ВН}}}}{1 + \varepsilon_{\theta_{\text{ВН}}}} = \frac{Z_1 - \frac{R_2}{R_1}}{2Z_1 - \frac{R_2}{R_1}}.$$

Равенство изгибающих моментов требует одинаковой протяженности зон растяжения и сжатия:

$$R_{\text{нар}} - \rho_{\text{Н}} = \rho_{\text{Н}} - R_{\text{ВН}}.$$

Отсюда следует равенство тангенциальных деформаций (по модулю)

$$\frac{(2 - Z_1) - \sqrt{4Z_1 - 3Z_1^2}}{\sqrt{4Z_1 - 3Z_1^2} - Z_1} = \frac{Z_1 - \frac{R_2}{R_1}}{Z_1}.$$

В табл. 1 приведены параметры гибки полосы для случая  $R_2 = \text{const}$  при различных толщинах  $S$  заготовки.

Таблица 1

**Параметры профилегибки полосы при  $R_2 = \text{const}$**

Параметры	$R_1/R_2$				
	1,1	1,3	1,5	2,0	3,0
$Z = \frac{R_2}{\rho_{\text{Н}}}$	0,952	0,868	0,795	0,649	0,465
$Z_1 = \frac{\rho_{\text{Н}}}{R_1}$	0,954	0,878	0,819	0,717	0,605
$\frac{R_{\text{нар}}}{R_2}$	1,098	1,283	1,458	1,868	2,631
$\frac{R_{\text{нар}}}{R_1}$	0,998	0,987	0,972	0,934	0,877
$\frac{R_2}{R_2}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\varepsilon_{\theta_{\text{нар}}}$	0,046	0,123	0,186	0,303	0,450
$\varepsilon_{r_{\text{yfH}}}$	-0,044	-0,110	-0,157	-0,232	-0,310
$\frac{S'}{S}$	0,977	0,942	0,915	0,868	0,816
$\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{Н}}} = Z \frac{R_{\text{нар}}}{R_2}$	1,045	1,113	1,159	1,212	1,223

Помимо данной схемы гибки может осуществляться процесс, когда боковые кромки верхнего валка будут прижимать полосу к контактной

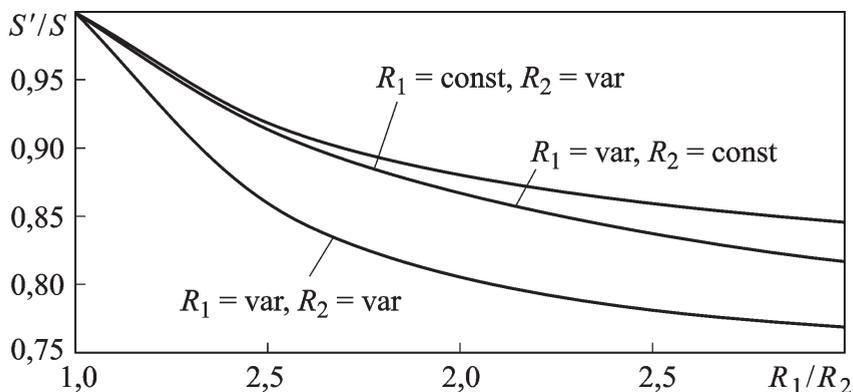


Рис. 1. Утонение полосы при гибке профилированием

поверхности нижнего валка, таким образом, процесс подгибки будет характеризоваться фиксацией наружного радиуса  $R_1 = \text{const}$ . В этом случае из равенства изгибающих моментов решение для нейтральной линии получится из условия

$$\frac{1 - Z_1}{Z_1} = \frac{\sqrt{5Z_1^2 - 8Z_1 \frac{R_2}{R_1} + 4 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2} - Z_1}{Z_1 - 2 \frac{R_2}{R_1} + \sqrt{5Z_1^2 - 8Z_1 \frac{R_2}{R_1} + 4 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2}}$$

Результаты решения равенства практически не отличаются от результатов, приведенных в табл. 1. Для сравнения на рис. 1 приведены изменения утонения заготовки для этих процессов.

Далее методика составления технологического маршрута профилирования с учетом изменения толщины заготовки по клетям начинается с анализа параметров и сложности профиля. На основе этих данных сначала определяется число калибров. Например, для профилирования уголкового профиля требуется шесть формующих калибров и один калибрующий (рис. 2).

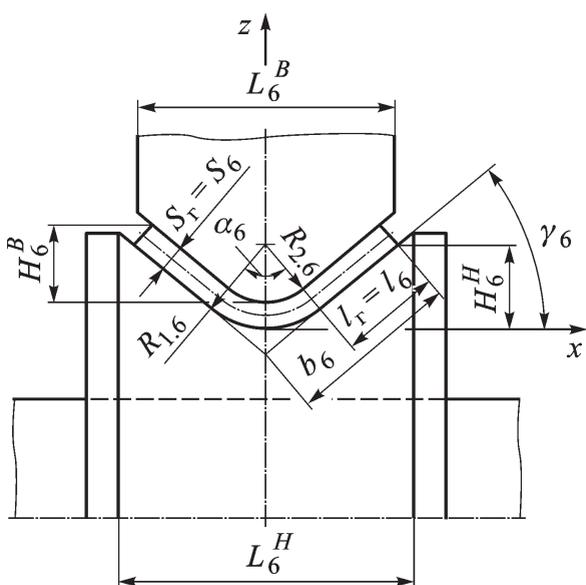


Рис. 2. Формовка равнополочного уголка (шестая клеть)

Площадь поперечного сечения этого изделия

$$F_{\text{изд}} = F_6 = 2 S_6 l_6 + \frac{\pi}{2} S_6 \rho_{\text{нб}},$$

где  $S_6$  — толщина полки в шестом проходе;  $l_6$  — длина полки без учета скругления;  $\rho_{\text{нб}}$  — радиус нейтральной поверхности изогнутого участка профиля.

Для формовки простых профилей обычно используется гибка с фиксированным радиусом по поверхности верхнего валка  $R_2 =$

$= \text{const} = R_{\text{вн}}$ , тогда параметром, определяющим геометрию и кинематику для шестой клетки, будет отношение  $\frac{R_{\text{нар6}}}{R_{\text{вн6}}} = \frac{R_{1.6}}{R_{2.6}}$ .

В табл. 2 приведены некоторые расчетные параметры для уголко-вых равнополочных профилей (ГОСТ 19771), равные соответствующим размерам уголка в седьмой (калибрующей) клетки.

Таблица 2

**Геометрические характеристики профилей**

№	Размеры, мм			$\frac{R_1}{R_2}$	$F, \text{мм}^2$	$\rho_{\text{н}}, \text{мм}$	$B, \text{мм}$	$l, \text{мм}$	$Z_1$	$\varepsilon_{\theta}$	$\frac{S'}{S}$	
	$b$	$S$	$R_2$									
1	50	3	4	1,75	1,67	292,905	5,50	97,635	44,5	0,786	0,273	0,888
2		4	6	1,67		386,240	8,00	96,560	42,0	0,800	0,251	0,896
3	70	4	6	1,67		546,240	8,00	136,56	62,0	0,800	0,251	0,896
4		5	7	1,71		779,575	9,50	155,92	70,5	0,792	0,262	0,892
5	80	6	9	1,67		929,040	12,0	154,84	68,0	0,800	0,251	0,896
6		7	9	1,78		1076,75	12,5	151,82	67,5	0,781	0,281	0,885
7	100	6	9	1,67		1169,04	12,0	194,84	88,0	0,800	0,251	0,896
8		6	14	1,43		1156,14	17,0	192,69	83,0	0,850	0,177	0,925

В принятом процессе гибки средний радиус будет равен нейтральному:  $\rho_{\text{н6}} = \frac{R_{1.6} + R_{2.6}}{2}$ , тогда длина плоской части полки  $l_6 = b_6 - \rho_{\text{н6}}$ .

На основании этого определяется площадь сечения  $F_6$  и ширина заготовки  $B_6 = \frac{F_6}{S_6}$ . Следующим этапом калибровки является выбор угла подгибки.

Окончательный угол  $\alpha_6$  (см. рис. 2) всегда будет отличаться от заданного ( $90^\circ$ ) на угол пружинения  $\Delta\alpha$ , зависящий от геометрии профиля, его материала и конструкции самого калибра. При принятой схеме деформации с фиксацией внутреннего радиуса относительная тангенциальная деформация растянутого слоя равна относительной тангенциальной деформации сжатого слоя:  $\varepsilon_{\theta\text{вн}} = \frac{Z_{1.6} - R_{2.6}/R_{1.6}}{Z_{1.6}}$ .

А далее вычисляется относительный параметр нейтрального слоя  $Z_{1.6} = \frac{\rho_{\text{н6}}}{R_{1.6}}$  и затем — тангенциальная деформация  $\varepsilon_{\theta}$ , которая будет определять степень упрочнения металла при гибке:  $\sigma_T = \sigma_{T_0} + K\varepsilon_{\theta}^n$  (табл. 3).

После выхода из калибра полоса несколько распрямляется. Упругий момент этой разгрузки  $M_{\text{раз}} = \sigma_{\text{упр}} \frac{S'^2}{6}$  определяет условное напряжение разгрузки  $\sigma_y = \frac{3}{2} (\sigma_{T_0} + K\varepsilon_{\theta}^n)$  и соответственно остаточное

Параметры упрочнения материалов [2]

Материал	$\sigma_{T_0}$ , МПа	$n$	$K$ , МПа
Сталь 10	300	0,60	400
Сталь 40	350	0,48	525
Сталь 50	400	0,47	623
12Х18Н9Т	410	0,70	974
17Х18Н9	600	0,70	1024
АМГ1	100	0,58	188
Д16	450	0,31	125
М1	250	0,58	300
Л80	100	0,70	730
Л59	175	0,64	500
ВТ1	440	0,54	450
ВТ6	820	0,37	1480

напряжение:

$$\sigma_{\text{ост}} = (\sigma_{T_0} + K\varepsilon_{\theta}^n) - \frac{3}{2}(\sigma_{T_0} + K\varepsilon_{\theta}^n) = -\frac{1}{2}(\sigma_{T_0} + K\varepsilon_{\theta}^n),$$

которое, по методике Е.А. Попова, определяет угол пружинения:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\sigma_{T_0}}{E} \left( 3 + 2 \frac{K\varepsilon_{\theta}^n}{\sigma_{T_0}} \right) \left( \frac{1}{\frac{R_{\text{нар6}}}{R_{\text{вн6}} - 1}} + 1 \right).$$

Например, для хромоникелевых сталей среднее отношение  $\frac{\varepsilon_{\theta}^n}{\sigma_{T_0}} = 2 \cdot 0,251^{0,7} = 0,76$  при  $\frac{R_{1,6}}{R_{2,6}} = 1,67$ , тогда

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{500}{1,9 \cdot 10^5} (3 + 2 \cdot 0,76) \left( \frac{1}{0,67} + 1 \right) = 0,0296.$$

Таким образом, для равнополочных уголков угол пружинения составит  $\Delta\alpha = 1,8^\circ \dots 2,7^\circ$ . Поэтому с некоторым запасом на последующую правку окончательно угол гибки принимается равным  $\alpha = 87,5^\circ \dots 88^\circ$ . Учитывая, что к концу процесса гибки будет увеличиваться упрочнение металла, т.е. в нем будут накапливаться остаточные напряжения от влияния предыдущих калибров, поэтому следует примерно до четвертого калибра более интенсивно подгибать кромки заготовки, а затем нагрузку снижать (табл. 4).

Далее с учетом изменения геометрии и утонения полосы рассчитывается калибровка. Предварительно (см. табл. 1) аппроксимируем

Значения угла гибки в семи клетях

Угол гибки	Номер прохода						
	1	2	3	4	5	6	7
$\alpha$ , град	162,5	145	127,5	110	100	92	88
$\gamma$ , град	8,75	17,5	26,25	35	40	44	46

утонение

$$\frac{S'}{S} = 1,2248 - 0,2768 \frac{R_1}{R_2} + 0,0468 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2$$

пропорционально углу гибки  $\Delta\alpha_i = \alpha_{i-1} - \alpha_i$ . Соответственно, толщина полосы в предыдущем калибре будет несколько больше ее толщины в последующем калибре:

$$\Delta S_6 = \left[ \frac{S_7}{(S'/S)_7} - S_7 \right] \frac{\Delta\alpha_{i-1}}{\alpha_7}.$$

На основе представленных формул рассмотрим гибку уголка  $50 \times 3$  мм ( $b_6 \times S_6$ ). В качестве значения утонения в последнем, седьмом калибре воспользуемся данными из табл. 2. Расчет проводится против хода профилирования. Поскольку в седьмом калибре заготовка получает свои окончательные размеры, то расчету, прежде всего, подлежат предшествующие ему шесть формирующих калибров. Для шестого калибра определяем изменение толщины полосы:

$$\Delta S_6 = \left( \frac{3}{0,888} - 3 \right) \frac{92^\circ - 88^\circ}{88^\circ} = 0,017 \text{ мм, откуда } S_6 = 3,017 \text{ мм.}$$

$$\begin{aligned} \text{Находим радиусы: } R_{1.6} &= R_{2.6} + S_6 = 4 + 3,017 = 7,017 \text{ мм,} \\ \rho_{н.6} &= \frac{7,017 + 4}{2} = 5,509 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Исходная ширина полосы  $B_6 = \frac{F_7}{S_6} = \frac{292,905}{3,017} = 97,08$  мм. Длина полки определяется из выражения  $l_i = \frac{B_i - 2\rho_{н.i}\gamma_i}{2}$ , где  $\gamma$  — угол в радианах, откуда  $l_6 = \frac{97,08 - 2 \cdot 5,509 \cdot 0,768}{2} = 44,31$  мм. Рабочая ширина нижнего вала составит

$$\begin{aligned} L_6^H &= 2(R_{1.6} \sin \gamma_6 + l_6 \cos \gamma_6) = \\ &= 2(7,017 \sin 44^\circ + 44,31 \cos 44^\circ) = 73,5 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Рабочая ширина верхнего вала

$$L_6^B = 2(R_{2.6} \sin \gamma_6 + l_6 \cos \gamma_6) = 2(4 \sin 44^\circ + 44,31 \cos 44^\circ) = 69,3 \text{ мм.}$$

Глубина профиля нижнего вала

$$H_6^H = R_{2.6} (1 - \cos \gamma_6) + l_6 \sin \gamma_6 = 4 (1 - \cos 44^\circ) + 44,31 \sin 44^\circ = 31,9 \text{ мм.}$$

Высота профиля верхнего вала

$$H_6^B = R_{1.6} (1 - \cos \gamma_6) + l_6 \sin \gamma_6 = \\ = 7,017 (1 - \cos 44^\circ) + 44,31 \sin 44^\circ = 32,75 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитываются калибры с пятого до первого.

В результате определяется исходная толщина заготовки:

$$S_0 = 3,00 + 0,017 + 0,036 + 0,046 + 0,083 + 0,087 + 0,091 + 0,096 = 3,456 \text{ мм.}$$

И аналогично исходная ширина полосы равна  $B = \frac{F_6}{S} = \frac{292,905}{3,456} = 84,75 \text{ мм.}$

Полученные результаты расчетов по переходам сведем в табл. 5, где  $\varepsilon_\theta = \frac{\rho_{Hi} - R_{2i}}{\rho_{Hi}}$  — тангенциальная деформация,  $\varepsilon_r = \frac{\rho_{Hi} - R_{1.i}}{R_{1.i}}$  — радиальная деформация.

Таблица 5

**Изменение толщины заготовки и технология изготовления равнополочного уголка (50×3 мм при  $R_2 = 4$  мм)**

Калибр	$\alpha$ , град	Размеры калибра, мм				Параметры гибки, мм				
		$L^H$	$L^B$	$H^H$	$H^B$	$R_1$	$S$	$B$	$\varepsilon_\theta$	$\varepsilon_r$
0	180	Исходная листовая заготовка				3,456	84,75	—	—	—
1	162,5	86,68	85,66	6,55	6,58	7,360	3,360	87,17	0,295	0,228
2	145,0	86,54	84,58	13,14	13,29	7,269	3,269	89,6	0,290	0,225
3	127,5	84,31	81,49	19,63	19,66	7,182	3,182	92,05	0,285	0,222
4	110,0	80,00	76,46	25,90	26,44	7,099	3,099	94,52	0,277	0,218
5	100,0	76,60	723,70	29,30	30,00	7,053	3,053	95,94	0,276	0,216
6	92,00	73,50	69,30	31,90	32,75	7,017	3,017	97,08	0,274	0,215
7	88(90)	Калибровка профиля				7	3,00	97,64	0,273	0,214

**Выводы.** 1. Проведен анализ изменения геометрии полосы при различных условиях профилигибки.

2. Разработана уточненная методика расчета калибров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г и б к а профилей на прессах и станах / Н.Д. Лукашкин, Л.С. Кохан, В.И. Пунин, Ю.А. Морозов. — М.: 2005.
2. Т е о р и я прокатки: Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. — М.: Металлургия, 1982.

Статья поступила в редакцию 30.06.2011

Владимир Иванович Пунин родился в 1959 г. Окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1982 г. Канд. техн. наук., ген. директор ООО “Ролтяжмаш”. Автор более 30 научных работ и 20 изобретений в области холодной гибки металлических профилей.

V.I. Punin (b. 1959) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1982. Ph. D. (Eng.), general director of ООО “Rolyazhmash”. Author of more than 30 publications and inventions in the field of cold bending of metal profiles.