

1. Бахтинов Б.П. Калибровка прокатных валков / Б.П.Бахтинов, М.М.Штернов. – М.: Металлургиздат, 1958. – 784с.
2. Илюкович Б.М. Прокатка и калибровка: справочник в 6 т. / Б.М.Илюкович, Н.Е.Нехаев, В.П.Капелюшный. – Днепропетровск: РИА «Днепро-вал», 2004. – Т.5: Калибровка швелерообразных и корытообразных профилей. – 2004. – 481с.
3. Коновалов Ю.В. Металлургия: учебное пособие в трех книгах. Т. 3 / Ю.В.Коновалов, А.А.Минаев. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2013. – 603с.
4. Совершенствование технологии производства сортовых профилей на стане 600 ОАО «АМК» / М.Б.Луцкий, И.К.Дорожко, А.А.Чичкан, В.А.Луценко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – №8-9. – С.188-192.
5. Чичкан А.А. Разработка элементов теории и технологии производства швеллеров с применением в фасонных калибрах переменного изгиба стенки: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.03.05 / А.А.Чичкан. – Донецк, 2000. – 21с.
6. Илюкович Б.М. Расчет и конструирование калибров при прокатке швеллеров по методу сгибания / Б.М.Илюкович // Сталь. – 1964. – №6. – С.532-534.

Надійшла до редколегії 27.04.2017.

УДК 621.771.01

МАКСИМЕНКО О.П., д. т. н., профессор
ПРИСЯЖНЫЙ А.Г.*, к. т. н., доцент
КУЗЬМИН Е.В., аспирант
КОСТРИЦА А.А., магистр

Днепропетровский государственный технический университет, г. Камянское
*Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОМЕНТА ПРИ ПРОКАТКЕ С НАТЯЖЕНИЕМ ПОЛОСЫ

Введение. При определении момента прокатки с натяжением полосы обычно пользуются известной формулой [1]:

$$M_{пр.} = P_{общ.} \cdot \psi \cdot l_d + \frac{Q_1 - Q_0}{4P_{ср} R b f_y}.$$

В приведенном выражении общая равнодействующая всех контактных сил $P_{общ.}$ направлена вертикально. Однако при прокатке со значительными натяжениями эта сила может существенно отклоняться от вертикали, что приводит к ошибкам в расчете момента. Кроме того, как показано в работах [2-4], в очаге деформации действует среднеинтегральная результирующая продольных сил $Q_{ср.пр.}$ пластически деформируемого металла, что увеличивает отклонение силы $P_{общ.}$ от вертикали.

Постановка задачи. В настоящем исследовании предложено определять момент прокатки с натяжением полосы, исходя из равнодействующей нормальных давлений P (рис.1) с учетом угла приложения этой силы ψ_1 и результирующей продольных сил $Q_{ср.пр.}$.

Результаты работы. Как видно из рис.1, силы P_x , $Q_{ср.пр.}$ и Q_0 действуют противоположно по отношению к направлению прокатки и образуют момент сопротивления. Активные силы $T_{отс} - T_{он}$ и Q_1 создают момент и обеспечивают устойчивость процесса прокатки, преодолевая момент сопротивления. Устойчивый процесс прокатки соблюдается, если выполняется следующее условие:

$$2 \cdot (T_{отс} - T_{он}) \cdot R + Q_1 \cdot \left(R + \frac{h_1}{2} \right) = Q_{ср.пр.} \cdot \left(R + \frac{h_1}{2} \right) + 2P_x \cdot \left(R - \frac{\Delta h_{\psi_1}}{2} \right) + Q_0 \cdot \left(R + \frac{h_1}{2} \right), \quad (1)$$

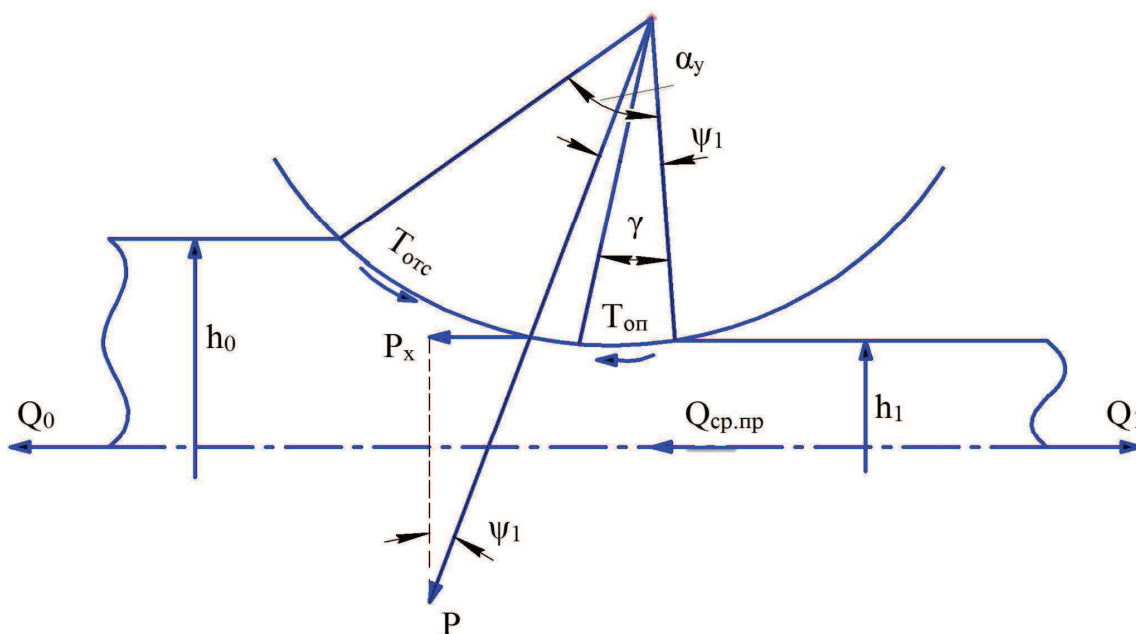


Рисунок 1 – Схема действующих сил

где $P_x = P \cdot \sin \psi_1$; $Q_{ср.пр.} = Q_{ср.пр.}^* \cdot 2k_{ср} R b$; $P = p_{ср} \cdot l_c \cdot b$; $Q_0 = \sigma_0 \cdot h_0 \cdot b$;

$$Q_1 = \sigma_1 \cdot h_1 \cdot b; T_{отс} - T_{он} = f_y \cdot p_{ср} R b \cdot (\alpha_c - 2 \cdot \gamma),$$

$T_{отс}$ и $T_{он}$ – равнодействующие удельных сил трения в зонах отставания и опережения;

Q_0 и Q_1 – силы заднего и переднего натяжения полосы;

$Q_{ср.пр.}^*$ – безразмерная результирующая продольных сил;

P – результирующая продольных напряжений P_x ;

Δh_{ψ_1} – обжатие полосы в сечении, соответствующему углу ψ_1 ;

ψ_1 – угол приложения равнодействующей P ;

γ – угол нейтрального сечения с учётом действия сил Q_0 и Q_1 , а также продольной силы $Q_{ср.пр.}$;

α_c и l_c – сплюснутый угол захвата и длина очага деформации;

p_{cp} и $2k_{cp}$ – средние значения давления и сопротивления деформации,

$$2k_{cp} = \beta\sigma_s;$$

b – ширина прокатываемой полосы.

Ввиду того, что $R \gg \Delta h_{\psi_1}$, сумму этих величин принимаем равными радиусу валков. После некоторых преобразований имеем:

$$\left(R + \frac{h_1}{2}\right) \cdot \left[Q_{cp.np.}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right] + 2 \cdot \frac{P_{cp}}{2k_{cp}} l_c \psi_1 = 2f_y \cdot \frac{P_{cp}}{2k_{cp}} \cdot R_c \cdot (\alpha_c - 2 \cdot \gamma) \cdot R. \quad (2)$$

Из последнего выражения найдём угол приложения равнодействующей:

$$\psi_1 = f_y \cdot \left(1 - \frac{2\gamma}{\alpha_c}\right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{R + \frac{h_1}{2}}{l_c} \cdot \frac{1}{\frac{P_{cp}}{2k_{cp}}} \cdot \left[Q_{cp.np.}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right]. \quad (3)$$

Как видно, с увеличением результирующей $Q_{cp.np.}^*$ и заднего натяжения полосы угол приложения равнодействующей P уменьшается. С ужесточением режима трения и ростом переднего натяжения полосы он увеличивается.

Заметим, что полный момент сопротивления, который необходимо преодолеть валкам с учетом натяжения полосы и действия результирующей продольных сил в очаге деформации определяются:

$$M_{np.n} = \left(R + \frac{h_1}{2}\right) \cdot \left[Q_{cp.np.}^* + Q_0 - Q_1 \right] + 2P_x \cdot R. \quad (4)$$

После некоторых преобразований имеем:

$$\begin{aligned} M_{np.n} &= \left(R + \frac{h_1}{2}\right) \cdot \left[Q_{cp.np.}^* \cdot 2k_{cp} R b + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \cdot h_0 b_0 2k_{cp} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \cdot h_1 b_1 2k_{cp} \right] + \\ &+ 2 \frac{P_{cp}}{2k_{cp_x}} \cdot R l_c b 2k_{cp} \psi_1 \cdot R; \\ M_{np.n} &= \left(R + \frac{h_1}{2}\right) \cdot \left[Q_{cp.np.}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right] \cdot 2k_{cp} R b + \frac{2P_{cp}}{2k_{cp_x}} l_c \psi_1 \cdot 2k_{cp} R b; \\ M_{np.n} &= 2k_{cp} R b \left\{ \left(R + \frac{h_1}{2}\right) \cdot \left[Q_{cp.np.}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right] 2 \frac{2P_{cp}}{2k_{cp_x}} l_c \psi_1 \right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

Рассчитаем угол ψ_1 приложения равнодействующей нормальных давлений и определим величину момента прокатки при деформации металла с натяжением и учетом результирующей продольных сил $Q_{cp.np.}^*$ в очаге деформации для условий, приведенных в работах [5, 6], и сравним полученные данные с опытными. В книге [5]

М.М.Сафьян привел результаты исследования энергосиловых и других параметров при горячей прокатке листовой стали в чистовой группе клетей непрерывного стана 1680. Для случая прокатки тонкого листа поперечными размерами 3x1400 мм из стали 3кп, параметры которого приведены в табл.1, рассчитали согласно методике [4] эпюры контактных и горизонтальных нормальных напряжений σ_x , кроме того, рассчитали эпюры текущих продольных сил и их среднеинтегральное результирующее значение в очаге деформации. Это позволило определить угол ψ_1 и $M_{np.n}$. Результаты расчетов и опытные данные показаны в табл.1.

Как видно, результирующая $Q_{cp.np}^*$ по всем клетям чистовой группы стана направлена противоположно движению полосы, из чего следует, что процесс прокатки совершается устойчиво, без частичных пробуксовок. Угол ψ_1 близок к углу нейтрального сечения γ , что соответствует выводам А.А.Королева, приведенным в [6].

Таблица 1 – Параметры деформации, опытные данные и результаты расчета момента прокатки при деформации полосы на стане 1680

№ клетки	h_1	R_{cn}	$\alpha_{cнл}$	f	$\frac{\sigma_0}{\beta\sigma_s}$	$\frac{\sigma_1}{\beta\sigma_s}$	$Q_{cp.np}^*$	$\frac{P_{cp}}{\beta\sigma_s}$	γ	ψ_1	M_{np} , кН·м		Расхожд.
	мм	мм	рад.						рад.	рад.	расчет	опыт	%
5	13,62	305	0,209	0,3	0	0,28	-0,0203	1,34	0,078	0,061	630	781	-19
6	8,33	305	0,131	0,23	0,28	0,2	-0,0006	1,03	0,037	0,073	410	385	6
7	5,61	342	0,089	0,18	0,2	0,14	-0,0028	1,16	0,03	0,054	297	270	9
8	4,28	367	0,059	0,18	0,14	0,23	-0,0025	1,17	0,025	0,015	136	157	13
9	3,37	388	0,048	0,18	0,23	0,13	-0,0020	1,22	0,018	0,018	120	100	17
10	3,0	409	0,03	0,18	0,13	0,01	-0,0019	1,25	0,013	0,016	38	47,5	-20

Аналогичные расчеты были выполнены при анализе опытной холодной прокатки ленты начальной толщины 1,95 мм и ширины 30 мм, приведенные в работе [6]. В этих опытах заднее и переднее натяжения изменялись в широких пределах. Кроме того, эксперимент включал измерение нормального давления, сплюсненной длины очага деформации, силы и момента прокатки. Геометрические параметры, результаты опытов и теоретических расчетов приведены в табл.2, из которой следует, что расчетный момент $M_{np.n}$ близок к опытным данным.

Таблица 2 – Результаты расчетов и опытные данные холодной прокатки с натяжением полосы

№ обр.	h_1	R_{cn}	α_{cn}	f	$\frac{\sigma_0}{2k_{cp}}$	$\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}$	$Q_{cp.np}^*$	$\frac{P_{cp}}{2k_{cp}}$	γ	$2k_{cp}$	ψ_1	M_{np} , кН·м		Расхожд.
	мм	мм	рад.						рад.	Н/мм ²	рад.	расчет	опыт	%
90	1,4	344	0,04	0,11	0,021	0	-0,0024	1,54	0,016	445	0,014	155	144	7
91	1,32	308	0,045	0,12	0,389	0	-0,0005	1,13	0,012	435	0,032	265	224	15,5
92	1,3	262	0,05	0,22	0,674		-0,0003	1,13	0,012	440	0,03	305	272	11
93	1,63	319	0,032	0,11	0,021	0	-0,0018	1,33	0,013	400	0,02	124	110	11
94	1,5	282	0,04	0,13	0,317	0	-0,0004	1,1	0,011	420	0,031	274	300	-9,5
95	1,36	325	0,043	0,13	0,015	0,37	-0,0034	1,74	0,017	435	0,021	212	176	17
96	1,35	249	0,049	0,13	0,015	0	-0,0024	1,32	0,024	440	0,01	142	112	21
97	1,32	346	0,043	0,11	0	0	-0,0027	1,65	0,017	445	0,016	181	160	12

98	1,3	254	0,051	0,13	0,28	0,08	-0,0014	1,27	0,016	445	0,027	256	250	2
99	1,2	231	0,057	0,24	0,668	0,289	-0,0007	1,18	0,016	450	0,023	275	230	16

Во всех случаях теоретическое значение момента превышает экспериментальное. При существенном заднем натяжении полосы (обр. 92 и 99) теоретически процесс совершается устойчиво только при ужесточении режима трения ($f_y > 0,2$). Практически, в случаях, когда $\frac{\sigma_0}{2k_{cp}} = 0,5-0,7$, прокатка ведётся в предельных условиях (обр. 91, 92, 94). Устойчивость процесса несколько повышается, если к полосе приложено значительное переднее натяжение (обр. 99). Эти выводы основаны на анализе результирующей продольных сил $Q_{cp.np.}^*$. Важно также подчеркнуть, что при прокатке без натяжения (обр. 97) составляющая момента, связанная с силой $Q_{cp.np.}^*$ (4), примерно равна половине от $2P_x \cdot R$. Последнее указывает на то, что результирующей продольной силой при анализе силовых условий пренебрегать не следует.

Выводы. Предложена методика расчета момента при прокатке полосы с натяжением. При его определении исходили из равнодействующей нормальных давлений, угла приложения этой силы в очаге деформации, а также из результирующей продольных сил пластически деформируемого металла и режима натяжения.

Результаты сравнения опытных и расчетных данных показали, что предложенная методика может быть рекомендована для определения момента при прокатке с натяжением полосы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А.П. Теория прокатки / А.П.Грудев. – [изд. 2-е перераб. и доп.] – М.: СП Интермет Инжиниринг, 2001. – 280с.
2. Максименко О.П. Уточнение условий продольной устойчивости процесса прокатки / О.П.Максименко, Р.Я.Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – №1. – С.41-43.
3. Максименко О.П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко, Р.Я.Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №6. – С.47-49.
4. Максименко О.П. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко, М.К.Измайлова. - Днепро-дзержинск: ДГТУ, 2016. – 213 с.
5. Сафьян М.М. Прокатка широкополосной стали / М.М.Сафьян.- М.: Metallurgy, 1969. – 460с.
6. Королев А.А. Новые исследования деформации металла при прокатке / А.А.Королев. – М.: Машгиз, 1953. – 267с.

Поступила в редколлегию 28.02.2017.