

УДК 621.771.014

Максименко О. П.
Присяжный А. Г.
Кухарь В. В.
Кузьмин Е. В.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОМЕНТА ПРИ ПРОКАТКЕ С НАТЯЖЕНИЕМ ПОЛОСЫ

Одним из основных показателей, позволяющих оценить эффективность работы того или иного прокатного стана, является удельный расход электрической энергии. Этот показатель существенно зависит от мощности и, следовательно, момента прокатки. Кроме того, момент прокатки в значительной степени влияет на долговечность оборудования, установленного в главных линиях прокатных станов (шпинделей, шестеренных клетей и др.), а правильность расчета его значений позволяет прогнозировать достоверные значения мощности главных электродвигателей. В связи со сказанным совершенствование методов расчета момента прокатки имеет важное научно-практическое значение.

Крутящий момент, который необходимо приложить к валкам для обеспечения их вращения при прокатке, чаще всего рассчитывают одним из методов: по контактным касательным напряжениям или силе прокатки [1]. Первый метод расчета разработан на основе допущения о равномерном распределении нормальных и касательных напряжений по контактной поверхности, в связи с чем его применение для условий прокатки на тонколистовых станах ограничено. Для указанных условий целесообразно использовать второй метод расчета, в котором влияние характера распределения давлений по дуге контакта полосы с валками учитывается через коэффициент плеча силы прокатки. При этом момент прокатки с натяжением полосы определяется по формуле [1]:

$$M_{np} = P_{общ} \psi l_d + \frac{Q_0 - Q_1}{2} R, \quad (1)$$

где $P_{общ}$ – общая равнодействующая контактных сил;

ψ – коэффициент плеча силы прокатки;

l_d – длина дуги контакта;

Q_0 и Q_1 – силы заднего и переднего натяжения полосы, соответственно;

R – радиус валков.

Сила $P_{общ}$, входящая в формулу (1), направлена вертикально. Однако при тонколистовой прокатке со значительными натяжениями полосы эта сила может существенно отклоняться от вертикали, что приводит к ошибкам в расчете момента прокатки. Кроме того, как показано в работах [2–4], в очаге деформации действует среднеинтегральная результирующая продольная сила пластически деформируемого металла $Q_{ср.пр}$, влияние которой на момент прокатки в рассмотренных методах расчета не учитывается. Вместе с тем действие силы $Q_{ср.пр}$ приводит к тому, что степень отклонения общей равнодействующей $P_{общ}$ контактных сил от вертикали увеличивается, в связи с чем ошибка в расчете момента прокатки по формуле (1) возрастает.

В связи с изложенным выше, сформулировали цель работы: усовершенствовать метод расчета момента прокатки с натяжением полосы и оценить степень достоверности результатов расчета, полученных с помощью данного метода.

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

го рисунка, силы N_x (N_x – проекция силы N на направление прокатки), $Q_{ср.пр}$ и Q_0 действуют противоположно по отношению к направлению прокатки и поэтому образуют момент сопротивления. Активные силы $T_{омс} - T_{он}$ ($T_{омс}$ и $T_{он}$ – равнодействующие удельных сил трения в зонах отставания и опережения, соответственно) и Q_1 создают момент прокатки и обеспечивают устойчивость процесса, преодолевая момент сопротивления. Устойчивый процесс прокатки обеспечивается, если выполняется следующее условие:

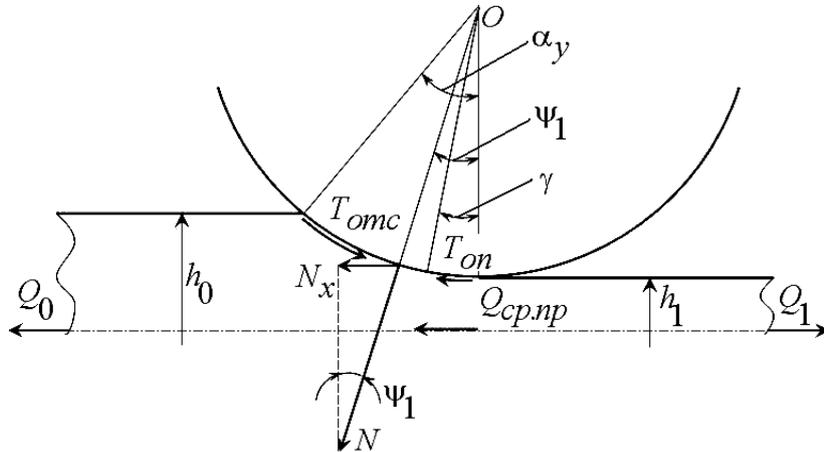


Рис. 1. Схема действующих сил

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

где h_1 – толщина полосы после пропуска;

Δh_{ψ_1} – абсолютное обжатие полосы в сечении, соответствующем углу ψ_1 приложения равнодействующей N в очаге деформации.

Активные силы, входящие в левую часть уравнения (2), определяются так:

$$T_{омс} - T_{он} = f_y p_{ср} R_c b (\alpha_y - 2\gamma), \quad Q_1 = \sigma_1 h_1 b, \quad (3)$$

где f_y – коэффициент трения в установившемся процессе прокатки;

$p_{ср}$ – среднее давление металла на валки;

R_c – радиус валков, определенный с учетом их упругого сплющивания;

b – ширина полосы;

α_y – угол захвата в установившемся процессе прокатки;

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

σ_1 – напряжение переднего натяжения.

Силы, входящие в правую часть уравнения (2) и препятствующие процессу прокатки, рассчитываются следующим образом:

$$N_x = N \sin \psi_1 \approx p_{ср} l_c b \psi_1, \quad Q_{ср.пр} = Q_{ср.пр}^* 2k_{ср} R b, \quad Q_0 = \sigma_0 h_0 b, \quad (4)$$

где l_c – длина дуги контакта, определенная с учетом сплющивания валков;

$Q_{ср.пр}^*$ – безразмерная результирующая продольных сил пластически деформируемого металла, рассчитываемая согласно работам [2–4];

$2k_{ср}$ – среднее значение сопротивления материала полосы чистому сдвигу;

σ_0 – напряжение заднего натяжения.

Так как $R \gg \Delta h_{\psi_1}$, можно записать, что $R - \Delta h_{\psi_1} / 2 \approx R$. С учетом этого, а также уравнений (3) и (4) условие устойчивости процесса прокатки (2) преобразуется к виду:

$$\left(R + \frac{h_1}{2}\right) \left[Q_{cp,np}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right] + 2 \frac{P_{cp}}{2k_{cp}} l_c \psi_1 = 2 f_y \frac{P_{cp}}{2k_{cp}} R_c (\alpha_y - 2\gamma). \quad (5)$$

Из выражения (5) найдем угол приложения равнодействующей нормальных давлений:

$$\psi_1 = f_y \left(1 - \frac{2\gamma}{\alpha_y} \right) - \frac{2R + h_1}{4l_c} \frac{1}{P_{cp} / 2k_{cp}} \left[Q_{cp,np}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right]. \quad (6)$$

Как следует из формулы (6), с увеличением результирующей $Q_{cp,np}^*$ и заднего натяжения полосы угол приложения равнодействующей контактных давлений N уменьшается. С ужесточением режима трения и ростом переднего натяжения полосы этот угол, наоборот, увеличивается. При этом полный момент сопротивления, который необходимо преодолеть валкам, с учетом натяжения полосы, действия результирующей продольных сил в очаге деформации и того, что $R - \Delta h_{\psi_1} / 2 \approx R$, определяется следующим образом:

$$M_{np,n} = \left(R + \frac{h_1}{2}\right) [Q_{cp,np} + Q_0 - Q_1] + 2N_x R. \quad (7)$$

С учетом уравнений (3) и (4) выражение (7) преобразовывается к виду:

$$M_{np,n} = 2k_{cp} R b \left\{ \left(R + \frac{h_1}{2}\right) \left[Q_{cp,np}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right] + 2 \frac{P_{cp}}{2k_{cp}} l_c \psi_1 \right\}. \quad (8)$$

Рассчитаем угол ψ_1 и определим величину момента прокатки при деформации металла с натяжением и с учетом результирующей продольных сил $Q_{cp,np}^*$ в очаге деформации для условий, которые приведены в работах [5, 6], и сравним полученные данные с опытными. В книге [5] М. М. Сафьяном представлены 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 СтЗкп, параметры которой приведены в табл. 1, рассчитаем согласно методике [3] эпюры контактных и горизонтальных σ_x нормальных напряжений, а также текущую продольную силу и найдем ее среднее интегральное результирующее значение в очаге деформации, что позволит определить угол ψ_1 и момент $M_{np,n}$. Результаты расчетов и опытные данные показаны в табл. 1, в которой Δ – расхождение расчетных и опытных значений момента прокатки. Как видно из табл. 1, результирующая $Q_{cp,np}^* < 0$ по всем клетям чистовой группы стана, то есть направлена противоположно движению полосы, из чего следует, что процесс прокатки совершается устойчиво. Угол ψ_1 близок к углу нейтрального сечения γ , что соответствует выводам А. А. Королева, приведенным в [6]. Если учесть, что опытные значения момента прокатки включают потери на трение в подшипниках валков, то результаты расчета $M_{np,n}$ в общем соответствуют опытными данным.

Аналогичные расчеты были выполнены при анализе опытных данных холодной прокатки ленты начальной толщиной 1,95 мм и шириной 30 мм, приведенных 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. Результаты опытов и теоретических расчетов приведены в табл. 2 (номера образцов соответствуют работе [6]).

Таблица 1

Параметры деформации, опытные данные и результаты расчета момента прокатки полосы на стане 1680

№ кле- ти	h_1 , мм	R_c , мм	α_y , рад	f_y , -	$\frac{\sigma_0}{2k_{cp}}$, -	$\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}$, -	$Q_{cp.np}^*$, -	$\frac{P_{cp}}{2k_{cp}}$, -	γ , рад	ψ_1 , рад	$M_{np.n}$, кН·м		
											расчет	опыт	Δ , %
5	13,62	305	0,209	0,300	0	0,28	-0,0203	1,341	0,078	0,061	630	781	-24,0
6	8,33	305	0,131	0,235	0,28	0,20	-0,0006	1,030	0,037	0,073	410	385	6,1
7	5,61	342	0,089	0,185	0,20	0,14	-0,0028	1,160	0,030	0,054	297	270	9,1
8	4,28	367	0,059	0,180	0,14	0,23	-0,0025	1,170	0,025	0,015	136	157	-15,4
9	3,37	388	0,048	0,180	0,23	0,13	-0,0020	1,220	0,018	0,018	120	100	16,7
10	3,00	409	0,030	0,180	0,13	0,01	-0,0019	1,250	0,013	0,016	38,0	47,5	-25,0

Таблица 2

Результаты расчетов и опытные данные холодной прокатки с натяжением полосы

№ об- разца	h_1 , мм	R_c , мм	α_y , рад	f_y , -	$\frac{\sigma_0}{2k_{cp}}$, -	$\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}$, -	$Q_{cp.np}^*$, -	$\frac{P_{cp}}{2k_{cp}}$, -	γ , рад	$2k_{cp}$, Н/мм ²	ψ_1 , рад	$M_{np.n}$, Н·м		
												расчет	опыт	Δ , %
90	1,40	344	0,040	0,11	0,021	0	-0,0024	1,54	0,016	445	0,014	1550	1440	7,1
91	1,32	308	0,045	0,12	0,389	0	-0,0005	1,13	0,012	435	0,032	2650	2240	15,5
92	1,30	262	0,050	0,22	0,674	0	-0,0003	1,13	0,012	440	0,030	3050	2720	10,8
93	1,63	319	0,032	0,11	0,021	0	-0,0018	1,33	0,013	400	0,020	1240	1100	11,3
94	1,50	282	0,040	0,13	0,317	0	-0,0004	1,10	0,011	420	0,031	2740	3000	-9,5
95	1,36	325	0,043	0,13	0,015	0	-0,0034	1,74	0,017	435	0,021	2120	1760	17,0
96	1,35	249	0,049	0,13	0,015	0,370	-0,0024	1,32	0,024	440	0,010	1420	1120	21,1
97	1,32	346	0,043	0,11	0	0	-0,0027	1,65	0,017	445	0,016	1810	1600	11,6
98	1,30	254	0,051	0,13	0,280	0,080	-0,0014	1,27	0,016	445	0,027	2560	2500	2,3
99	1,20	231	0,057	0,24	0,668	0,289	-0,0007	1,18	0,016	450	0,023	2750	2300	16,3

Из табл. 2 следует, что расчетный момент $M_{пр.п}$ близок к опытным данным. Практически во всех случаях теоретические значения момента превышают опытные. При существенном заднем натяжении полосы (образцы 92 и 99) теоретически процесс совершается устойчиво только при жесточенном режиме трения ($f_y > 0,2$). Практически, в случаях, когда $\sigma_0/2k_{ср} = 0,3 \div 0,7$, прокатка ведется в предельных условиях (образцы 91, 92 и 94). Устойчивость процесса несколько повышается, если к полосе приложено значительное переднее натяжение (образец 99). Эти выводы основаны на анализе результирующей продольных сил $Q_{ср.пр}^*$. Важно также подчеркнуть, что при прокатке без натяжения (образец 97) составляющая момента, связанная с силой $Q_{ср.пр}^*$ (формула (8)), примерно равна половине от $2N_x R$, в связи с чем влиянием этой силы на момент прокатки пренебрегать не следует.

ВЫВОДЫ

Усовершенствован метод расчета момента при прокатке полосы с натяжением, учитывающий влияние результирующей продольных сил пластически деформируемого металла. Результаты сравнения опытных и расчетных данных показали, что предложенный метод может быть рекомендован для определения момента при прокатке с натяжением полосы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грудев А. П. *Теория прокатки* / А. П. Грудев. – [изд. 2-е перераб. и доп.] – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
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. – Днепропетровск : ДГТУ, 2016. – 212 с.
5. Сафьян М. М. *Прокатка широкополосной стали* / М. М. Сафьян. – М. : Metallurgija, 1969. – 460 с.
6. Королев А. А. *Новые исследования деформации металла при прокатке* / А. А. Королев. – М. : Mashgiz, 1953. – 267 с.

REFERENCES

1. Grudev A. P. *Teorija prokatki* / A. P. Grudev. – [izd. 2-e pererab. i dop.] – M. : Intermet Inzhiniring, 2001. – 280 s.
2. Maksimenko O. P. Utochnenie uslovij prodol'noj ustojchivosti processa prokatki / O. P. Maksimenko, R. Ja. Romanjuk // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. – 2011. – № 1. – S. 41–43.
3. Maksimenko O. P. Analiz silovogo vzaimodejstvija v ochage deformacii pri prokatke / O. P. Maksimenko, D. I. Lobjko, R. Ja. Romanjuk // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. – 2013. – № 6. – S. 47–49.
4. Maksimenko O. P. *Prodol'naja ustojchivost' polosy v valkah s analizom kontaktnyh uslovij : monografija* / O. P. Maksimenko, D. I. Lobjko, M. K. Izmajlova. – Dneprodzerzhinsk : DGTU, 2016. – 212 s.
5. Saf'jan M. M. *Prokatka shirokopolosnoj stali* / M. M. Saf'jan. – M. : Metallurgija, 1969. – 460 s.
6. Korolev A. A. *Novye issledovanija deformacii metalla pri prokatke* / A. A. Korolev. – M. : Mashgiz, 1953. – 267 s.

Максименко О. П. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ
Присяжный А. Г. – канд. техн. наук, доц. ГВУЗ «ЛГТУ»
Кухарь В. В. – д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ЛГТУ»
Кузьмин Е. В. – аспирант ДГТУ

ДГТУ – Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское;
ГВУЗ «ЛГТУ» – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь.

E-mail: andrejprisyazhnyj@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 03.03.2017 г.