

УДК 621.771.01

Максименко О. П.
Романюк Р. Я.

УТОЧНЕНИЕ РЕЖИМА НАТЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ НА СТАНЕ 1700

Известное в теории положение о том, что при прокатке с нейтральным углом, равным нулю, возникают предельные условия в установившемся режиме, на практике не всегда выполняется. Об этом свидетельствуют опытные данные А. П. Чекмарёва [1], А. П. Грудева [2] и др., показывающие, что частичная или полная пробуксовка металла в валках может начинаться при значительном опережении, т. е. при существенном запасе сил трения.

С другой стороны, имеются исследования [3–5], из которых следует, что процесс прокатки может совершаться устойчиво при однозонном скольжении полосы в очаге деформации.

В статьях [6–8], на основе анализа текущей горизонтальной контактной силы Q_x^* или её среднего значения Q_{cp}^* , предложен метод оценки продольной устойчивости процесса прокатки. Согласно с этим методом, если сила Q_{cp}^* положительна, т. е. направлена в соответствии с движением полосы, то процесс деформации будет протекать устойчиво, если Q_{cp}^* равна нулю, наступают предельные условия прокатки, а при $Q_{cp}^* < 0$, процесс невозможен.

Целью настоящей работы является оценка устойчивости процесса прокатки в производственных условиях на непрерывном стане 1700 металлургического комбината «Северсталь».

Стан 1700 предназначен для холодной прокатки тонких листов сечением $0,5\text{--}3 \times 900\text{--}1500$ мм из углеродистой, конструкционной и низколегированной стали. Сечение заготовки $1,8\text{--}5,5 \times 890\text{--}1420$ мм. Максимальная скорость прокатки составляет 25 м/с, диаметр рабочих валков 470–500 мм, длина бочки 700 мм.

Оценку продольной устойчивости процесса будем рассматривать на примере прокатки листа $0,78 \times 1265$ мм. Существующий режим обжатий и энергосиловые параметры при производстве данного листа приведены в табл. 1 [9].

Таблица 1

Существующий режим обжатий и энергосиловые параметры при производстве листа $0,78 \times 1265$ мм

№ клетки	h_0 , мм	h_1 , мм	ε , %	q_0 , МПа	q_1 , МПа	f_y	p_{cp} , МПа	P , МН	Q_{cp} , кН
1	2,5	1,84	26,4	45	179	0,082	464	8,73	79,5
2	1,84	1,28	30,4	179	151	0,053	525	9,3	-81,5
3	1,28	0,94	26,6	151	204	0,052	623	9,16	3,8
4	0,94	0,78	17	204	45	0,065	700	8,21	16,2

Анализ устойчивости процесса прокатки в каждой клетке начинается с расчёта эпюр контактных напряжений. Теоретически их можно получить при совместном решении дифференциального уравнения равновесия Т. Кармана и модели трения. Для учёта влияния зоны прилипания в очаге деформации предлагается использовать следующую модель:

$$\frac{t_x}{2k} = \begin{cases} f_y \frac{p_x}{2k}, & \text{при } \alpha > \varphi > \varphi^*; \\ f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}, & \text{при } \varphi^* > \varphi > \varphi^{**}; \\ -f_y \frac{p_x}{2k}, & \text{при } \varphi^{**} > \varphi > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где φ^* – угол, соответствующий сечению перехода от закона Кулона, который действует в зоне отставания, к модели, которая описывает зону прилипания;

$\frac{P_x}{2k}$ – безразмерное давление в сечении φ^* ;

γ – угол нейтрального сечения;

f_y – коэффициент трения в зонах скольжения;

k – сопротивление металла чистому сдвигу;

φ^{**} – угол, соответствующий сечению перехода от закона Кулона, который действует в зоне опережения, к модели, которая описывает зону прилипания.

Углы φ^* и φ^{**} выбираются итерационным путём с применением ЭВМ при выполнении следующих условий:

Величина удельных сил трения в безразмерном виде не должна превышать 0,5, т. е.:

$$0,5 \geq \frac{t_x}{2k} \geq -0,5.$$

Средний коэффициент трения, определяемый из эпюр контактных напряжений по формуле:

$$f_{cp} = \frac{\int_0^\alpha \frac{t_x}{2k} d\varphi}{\int_0^\alpha \frac{P_x}{2k} d\varphi},$$

должен быть равен коэффициенту трения, f_y , определяемому по известным эмпирическим формулам, например [10].

Данная модель состоит из трёх участков: 2 участка, где выполняется закон Кулона и зона, где осуществляется плавный переход от максимальных значений удельных сил трения к минимальным. Подставив модель (1) в дифференциальное уравнение равновесия, и решив его методом последовательных приближений Рунге-Кутты с граничными условиями:

$\frac{P_x}{2k} = 1 - \frac{q_0}{2k}$ при $\varphi = \alpha$, и $\frac{P_x}{2k} = 1 - \frac{q_1}{2k}$ при $\varphi = 0$ (q_0 и q_1 – заднее и переднее удельные натяжения),

получаем эпюру распределения нормального давления. Из эпюр контактных напряжений, согласно методике [6-8], находим распределения напряжений $\frac{q_x}{2k} = -\frac{P_x}{2k} \sin \varphi + \frac{t_x}{2k} \cos \varphi$

и текущей результирующей горизонтальных контактных сил $Q_x^* = \int_\varphi^\alpha \frac{q_x}{2k} d\varphi$, а затем рассчиты-

ваем силу Q_{cp}^* . Расчёт средней результирующей горизонтальных контактных сил Q_{cp}^* выполнен для каждой клетки стана 1700. Полученные результаты приведены в табл. 1 (Q_{cp}).

Расчёты показали, что во всех клетях, за исключением второй (здесь $Q_{cp}^* < 0$), процесс ведётся устойчиво. По-видимому, в целом по стану устойчивость прокатки достигается за счёт тянущей способности третьей клетки. Это также видно по значительно меньшему значению силы Q_{cp}^* в этой клетке (3,8 кН). Такие условия деформации нельзя признать удовлетворительными, т. к. любое нарушение технологического процесса может привести к аварийным ситуациям на стане, а также нарушению геометрических размеров листа.

Проанализируем силовые параметры прокатки во второй клетке более подробно. Эпюры контактных и горизонтальных напряжений, а также текущей результирующей продольных контактных сил Q_x^* для этой клетки приведены на рис. 1.

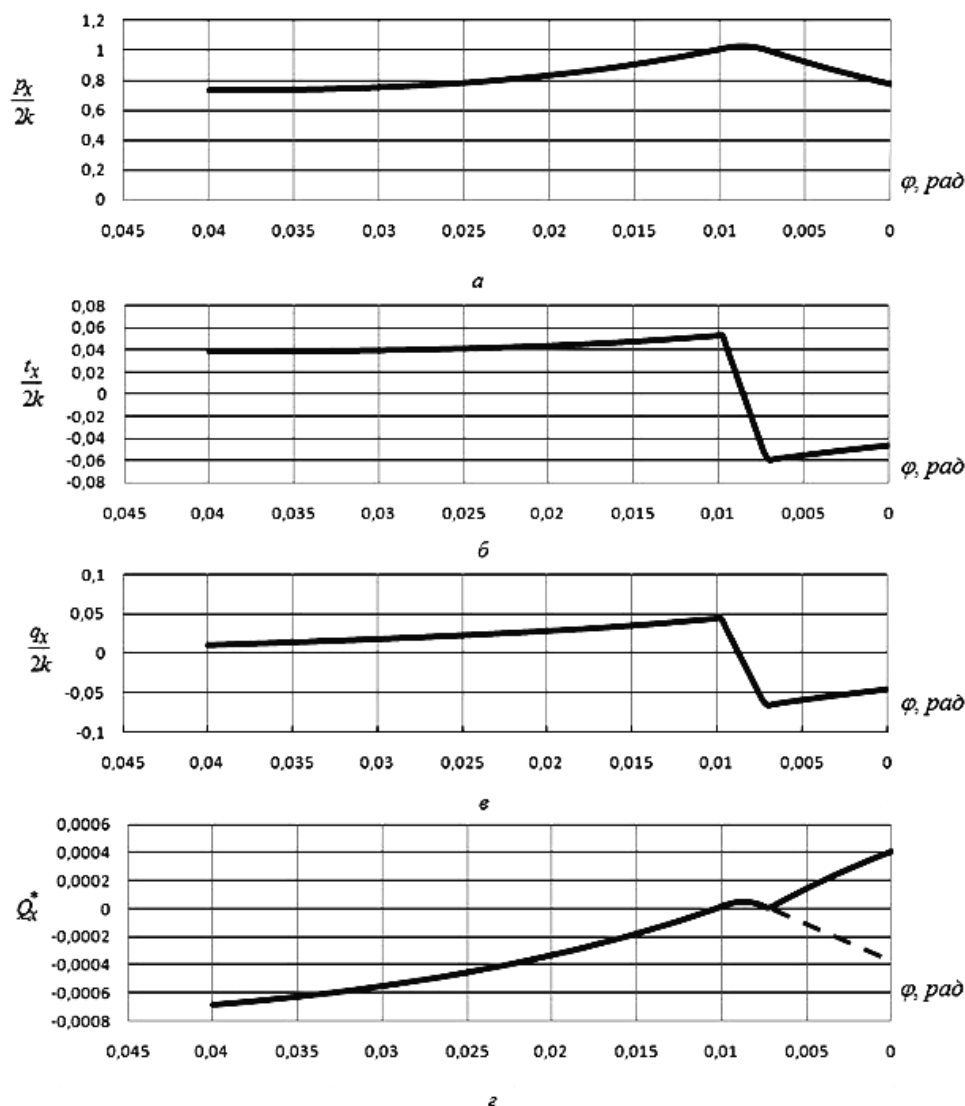


Рис. 1. Эпюры изменения контактных и горизонтальных напряжений, а также силы Q_x^* (Г) во второй клетке согласно работе [9]

Как видно из рисунка, на границах зоны контакта нормальные давления меньше единицы в результате действия растягивающих напряжений (рис. 1, а), а сила Q_x^* в этих же сечениях (рис. 1, г) соответствует значениям сил переднего и заднего натяжения.

Анализируя изменение силы Q_x^* , следует обратить внимание на то, что она вблизи выхода полосы из очага деформации обращается в ноль и имеет точку перегиба. Это связано с тем, что в этом сечении $\frac{p_x}{2k} = 1$, а с учётом условия пластичности $\frac{\sigma_x}{2k} = 0$ (σ_x – продольное нормальное напряжение пластически деформируемого металла). Очевидно, что в этом сечении и продольная сила $Q_{xвн} = \sigma_x h_x b$ (h_x – текущая толщина полосы, b – её ширина) также равна нулю. С учётом того, что в каждом сечении $Q_{xвн}^* = 2Q_x^*$ [6–8], то в указанном сечении и текущая контактная сила Q_x^* должна быть равна нулю. Перегиб кривой Q_x^* объясняется

тем, что после этого сечения напряжение σ_x становится растягивающим и знак перед этим напряжением в уравнении пластичности меняется на противоположный (с минуса на плюс). На выходе из очага деформации σ_x равно переднему удельному натяжению.

Итак, проведенные расчёты показывают, что прокатка во второй клетке ведётся неустойчиво, что может быть связано как с обжатием металла в этой клетке, так и со значительным задним натяжением полосы и сравнительно малым коэффициентом трения ($f_{cp} = 0,053$).

Для обеспечения устойчивости процесса прокатки во всех клетях предлагается уменьшить заднее натяжение во второй, а, следовательно, и переднее натяжение в первой клетях. Режимы обжатий и трения при этом не изменяются. Параметры деформации в последних двух клетях также остаются прежними. Уточнённый режим натяжений в клетях, а также результаты расчёта средней результирующей контактных горизонтальных сил, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Уточнённый режим натяжений и результаты расчёта энергосиловых параметров при производстве листа $0,78 \times 1265$ мм

№ клетки	h_0 , мм	h_1 , мм	ε , %	q_0 , МПа	q_1 , МПа	f_{cp}	p_{cp} , МПа	P , МН	Q_{cp} , кН
1	2,5	1,84	26,4	45	90	0,081	588,3	10,78	80,2
2	1,84	1,28	30,4	90	151	0,052	659,2	11,5	2,9
3	1,28	0,94	26,6	151	204	0,052	623	9,16	3,8
4	0,94	0,78	17	204	45	0,065	700	8,21	16,2

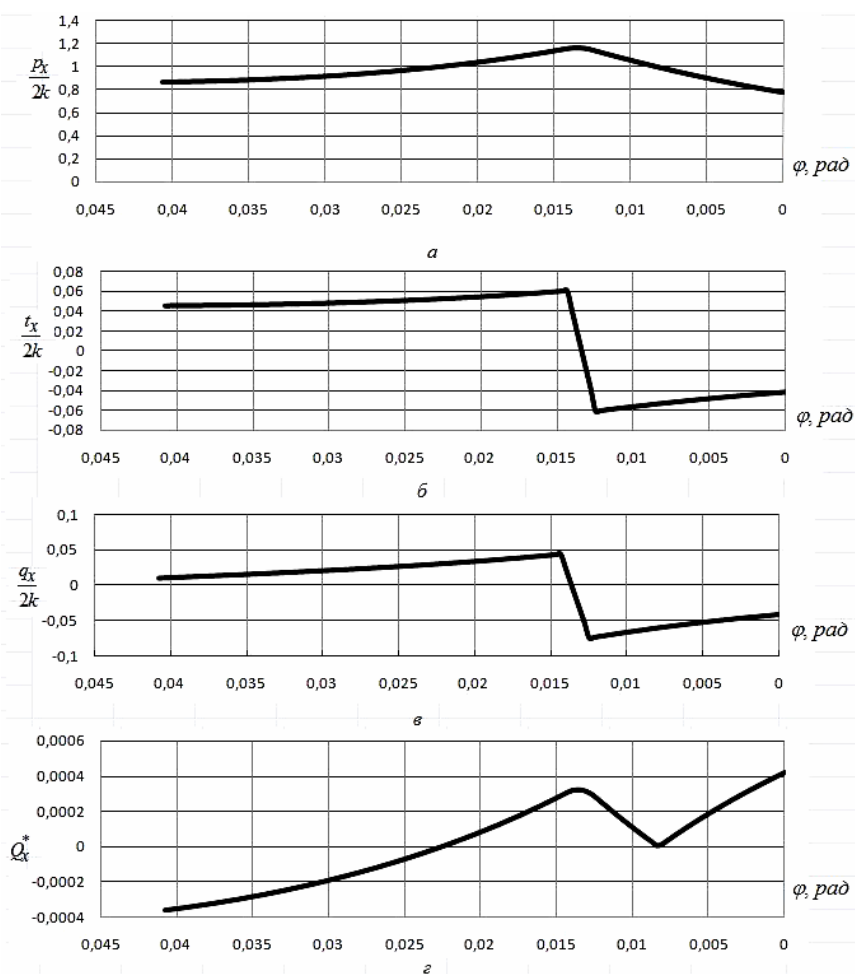


Рис. 2. Распределение по очагу деформации контактных и горизонтальных напряжений, а также силы Q_x^* во второй клетке по предлагаемому режиму натяжений

Как видно, за счёт снижения заднего натяжения во второй клетке со 179 МПа до 90 МПа, обеспечивается устойчивое ведение процесса прокатки в данной клетке. При этом уменьшение переднего натяжения в первой клетке практически не сказалось на ухудшении устойчивости прокатки в указанной клетке. Эпюры изменения по длине очага деформации контактных и результирующих горизонтальных напряжений, а также силы Q_x^* для второй клетки по предлагаемому режиму натяжения приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, г, положительная область изменения силы Q_x^* является большей, чем отрицательная, поэтому $Q_{cp}^* > 0$ и процесс является устойчивым.

Таким образом, можно рекомендовать данный режим натяжения при прокатке листа $0,78 \times 1650$ мм на стане 1700 комбината «Северсталь».

ВЫВОДЫ

Проанализирована продольная устойчивость процесса прокатки в клетках стана 1700. Показано, что во второй клетке процесс прокатки совершается неустойчиво. Предложено для повышения продольной устойчивости прокатки в данной клетке уменьшить заднее удельное натяжение металла с 179 МПа до 90 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чекмарев А. П. Экспериментальное исследование максимальных углов захвата в установившемся процессе прокатки / А. П. Чекмарев, В. И. Прокофьев // *Обработка металлов давлением : науч. труды, ДМетИ.* – М. : *Металлургия*, 1967. – Выпуск ЛП. – С. 79–88.
2. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев. – М. : *СП Интермет Инжиниринг*, 1998. – 283 с.
3. Мидзуно Т. Экспериментальное исследование холодной прокатки / Т. Мидзуно // *Сосей-то како.* – 1966. – № 66. – Т. 7. – С. 363–389.
4. Павлов И. М. К вопросу об отрицательном опережении при прокатке / И. М. Павлов, В. К. Белосевич // *Изв. вуз. Чёрная металлургия.* – 1961. – № 10. – С. 46–49.
5. Николаев В. А. Технологические параметры прокатки с высоковязкими смазками / В. А. Николаев // *Изв. вуз. Чёрная Металлургия.* – 1995. – № 4. – С. 29–32.
6. Максименко О. П. Уточнение условий продольной устойчивости процесса прокатки / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. – № 1. – С. 41–43.
7. Максименко О. П. Исследование средней результирующей горизонтальных сил в очаге деформации при прокатке / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Изв. вуз. Чёрная металлургия.* – 2009. – № 10. – С. 22–24.
8. Максименко О. П. Анализ равновесия сил в очаге деформации при простом процессе прокатки / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Вісник Національного технічного університету України «КПІ».* – К. : *НТУУ «КПІ»*, 2010. – № 59. – С. 161–164. – (Серія «Машинобудування»).
9. Уточнение методики расчета энергосиловых параметров при холодной полосовой прокатке с большим градиентом удельных натяжений / Я. Д. Василев, Д. В. Коноводов, А. В. Дементиенко, Д. Н. Самокиш, М. И. Завгородний // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 191–194.
10. Василев Я. Д. Теорія позовжньої прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк : *УНІТЕХ*, 2009. – 488 с.

Максименко О. П. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ;

Романюк Р. Я. – аспирант ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,
г. Днепродзержинск.

E-mail: r22roma@mail.ru