

УДК.621.771.01

МАКСИМЕНКО О. П., д.т.н., профессор  
 ЛОБОЙКО Д. И., ассистент  
 ШТОДА М. Н., к.т.н., доцент  
 ШТОДА И. И., зав. лаборатории

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское, Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ НА НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНАХ

**Введение.** В работах [1-3] разработана методика оценки продольной устойчивости полосы в очаге деформации при простом процессе прокатки. Она основана на расчете средней результирующей продольных сил пластически деформируемого металла  $Q_{ср.пр.}^*$ . По величине и направлению этой результирующей можно судить в каких условиях совершается процесс прокатки вплоть до начала торможения полосы в валка. Она так же фиксирует потерю равновесия сил в контактной зоне ещё при наличии в очаге деформации зоны опережения, т.е. до принятого теорией предельного условия  $\gamma = 0$  ( $\gamma$  – угол нейтрального сечения). Факт потери такого равновесия проанализирован и экспериментально, что отражено в исследованиях [4, 5].

Особое значение вопрос потери продольной устойчивости металла приобретает при непрерывной прокатке, когда в установившемся режиме обязательным условием является вопрос согласования сил заднего и переднего натяжений в предыдущей и последующей клетях. При этом следует учитывать, что удельное заднее натяжение полосы в данной клетке может быть существенно больше по сравнению с передним.

**Постановка задачи.** Целью настоящего исследования является анализ продольной устойчивости процесса при непрерывной прокатке с учётом влияния на неё натяжения полосы, модели трения на контакте и характера изменения сопротивления деформации металла.

**Результаты исследования.** Наиболее корректно соблюдается условие равновесия сил переднего и заднего натяжения полосы между клетями, если при решении уравнения Т. Кармана учитывается текущее значение напряжения текучести в каждом проходе  $\sigma_{Ti_x}$ . Исходным выражением при определении этого напряжения может служить известная в теории формула [6]:

$$\sigma_{Ti} = \sigma_{T_{исх.}} + A(\sum \varepsilon_i)^a \quad (1)$$

Ориентируясь на (1), в первом приближении,  $\sigma_{Ti_x}$  может быть получено из следующего выражения:

$$\sigma_{Ti_x} = \sigma_{T_{исх.}} + A \left( \sum \varepsilon_i - \frac{R\varphi_i^2}{h_3} \right)^a, \quad (2)$$

где  $\sigma_{T_{исх.}}$ ,  $\sigma_{Ti_x}$  и  $\sigma_{Ti}$  – исходное напряжение текучести, его текущее значение в очаге деформации и на выходе из валков  $i$ -ой клетки, соответственно;  $\sum \varepsilon_i$  – суммарное относительное обжатие в  $i$ -том проходе;  $R$  – радиус валков;  $\varphi_i$  – текущий угол захвата в  $i$ -ом проходе;  $h_3$  – толщина заготовки;  $a$  и  $A$  – эмпирические коэффициенты, их значение для разных марок прокатываемых сталей приведены в [7].

Если функция (2) не достаточно точно отражает характер упрочнения металла, приходится напряжения  $\sigma_{T_{i,x}}$  усреднять в очагах деформации каждой из клеток, например, в соответствии с методикой, приведенной в [6] и далее определять среднее сопротивление деформации  $2k_{cp_i}$ . При этом согласование безразмерных удельных натяжений на выходе полосы из данной клетки  $q_{1_i}$  и входе в последующую  $q_{0_{i+1}}$  достигается следующим путём:

$$q_{0_{i+1}} = \frac{2k_{cp_i}}{2k_{cp_{i+1}}} q_{1_i}; \tag{3}$$

$$q_{0_{i+1}} = \frac{\sigma_{0_{i+1}}}{2k_{cp_{i+1}}}; q_{1_i} = \frac{\sigma_{1_i}}{2k_{cp_i}},$$

где  $2k_{cp_i}$  и  $2k_{cp_{i+1}}$  – среднее сопротивление деформации металла в предыдущей и последующей клетях;  $\sigma_{1_i}$  и  $\sigma_{0_{i+1}}$  – соответственно переднее и заднее удельные натяжения.

Условие (3) получено исходя из равенства:  $\sigma_{1_i}$  и  $\sigma_{0_{i+1}}$  при установившемся процессе непрерывной прокатки.

В качестве модели трения на контакте полосы с валками в одном случае использовали выражение [8], обеспечивающее плавное изменение касательных напряжений в очаге деформации и соответствующее некоторым положениям теории. В другом – приняли кулоновскую зависимость  $t_x = f_y p_x$ .

В соответствии с методикой [1] рассчитываем значения средней результирующей силы  $Q_{cp.пр}^*$  в очагах деформации четырехклетевого стана 1680 при холодной прокатке листа поперечными размерами 0,6×1000 мм из стали 08кп, а также оценим продольную устойчивость процесса. Режим обжатий, кинематические и силовые параметры при производстве листа указанных размеров взяты из работы [9] и представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Режим обжатий, напряжения текучести и удельные натяжения при прокатке на стане 1680 листа (ст. 08кп) поперечными размерами 0,6×1000 мм

№ клетки	$h_0$ , мм	$\varepsilon$	$\varepsilon_\Sigma$	$ld_{cp}$ , мм	$\alpha_{cp}$ , рад	$R_{cp}$ , мм	$f_y$	$\sigma_{T_0}$ , МПа	$\sigma_{T_1}$ , МПа	$\sigma_{T_{cp}}$ , МПа	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_1$ , МПа	$q_0$	$q_1$	$\frac{P_{cp.оп.}}{2k_{cp}}$
1	2,0	0,35	0,35	16,1	0,0434	370	0,112	275	567	421	20	172	0,073	0,303	1,4
2	1,3	0,29	0,54	12,0	0,03167	379	0,056	567	654	610	172	200	0,303	0,306	0,878
3	0,92	0,26	0,66	10,2	0,02353	434	0,054	654	701	678	200	224	0,306	0,32	0,844
4	0,68	0,12	0,7	8,3	0,00964	861	0,08	701	718	710	224	40	0,32	0,056	1,01

Результаты вычислений силы  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$ , угла нейтрального сечения  $\gamma$  и безразмерного среднего давления  $\frac{P_{\text{ср}}}{2k_{\text{ср}}}$  при обеих моделях трения и разном упрочнении металла приведены в верхней части таблицы 2 и 3. Анализируя результаты табл. 2 приходим к выводу, что при обеих моделях трения во втором и третьем проходах устойчивый процесс прокатки невозможен. Этот вывод следует из того, что сила  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$  принимает положительные значения, т.е. в очагах деформации этих клеток она направлена по движению полосы и как бы помогает процессу. Но, как указывалось в исследованиях [1, 2], эта сила является силой сопротивления и потому активную роль в зоне деформации играть не может. Заметим, что в очагах деформации 2 и 3 клеток процесс совершается при наличии зоны опережения ( $\gamma > 0$ ), а следовательно предельное условие  $\gamma = 0$  не выполняется. Нарушение равновесия полосы в валках начинается ещё при наличии зоны опережения. На рис. 1 приведены эпюры распределения давления  $\frac{P_{\text{ср}}}{2k_x}$ , удельных сил трения  $\frac{t_x}{2k_x}$  и текущей продольной силы  $Q_{\text{хпр.}}^*$  для условий прокатки во второй клетки при модели трения [8] и переменном напряжении текучести металла. Как видно, в этом случае прокатки силы  $Q_{\text{хпр.}}^*$  в одной части очага деформации направлены по движению полосы, в другой – противоположно, причем площадь положительных значений этой текущей силы превышает площадь отрицательных, что и приводит к неравенству  $Q_{\text{ср.пр.}}^* > 0$ . Аналогичная картина наблюдается и при использовании в вычислениях кулоновской модели трения.

Таблица 2 – Результаты расчета параметров устойчивости процесса при переменной кривой упрочнения металла по длине очага деформации

№ клетки	Расчеты при параметрах прокатки работы [9]							
	Модель трения [8]				Модель Кулона $t_x = f_y p_x$			
	$f_{\text{ср}}$	$Q_{\text{ср.пр.}}^*$	$\gamma$	$\frac{P_{\text{ср}}}{2k_{\text{ср}}}$	$f_y$	$Q_{\text{ср.пр.}}^*$	$\gamma$	$\frac{P_{\text{ср}}}{2k_{\text{ср}}}$
1	0,112	-0,00112	0,011	1,32	0,112	-0,0002	0,012	0,99
2	0,056	+0,00021	0,0074	0,909	0,056	+0,00041	0,0077	0,79
3	0,054	+0,00001	0,0063	0,886	0,054	+0,00009	0,0077	0,88
4	0,08	-0,00059	0,0029	1,83	0,08	-0,00024	0,0036	1,34
№ клетки	Расчеты при скорректированном коэффициенте трения							
1	0,096	-0,00042	0,01	1,11	0,112	-0,0002	0,012	0,99
2	0,078	-0,00038	0,0083	1,15	0,09	-0,00016	0,0108	1,03
3	0,070	-0,00048	0,006	1,285	0,09	-0,00039	0,0093	1,19
4	0,072	-0,00043	0,0028	1,6	0,08	-0,00024	0,0036	1,34

Следует обратить внимание на то, что при прокатке на непрерывном стане 1680 в качестве технологической смазки применяется эмульсия на основе минерального масла индустриальное 20. При прокатке с этой смазкой вряд ли коэффициент трения может быть 0,05–0,06. Как показывают опыты А. П. Грудева [10] при деформации металла в этих условиях коэффициент трения должен быть не менее, чем 0,07–0,08.

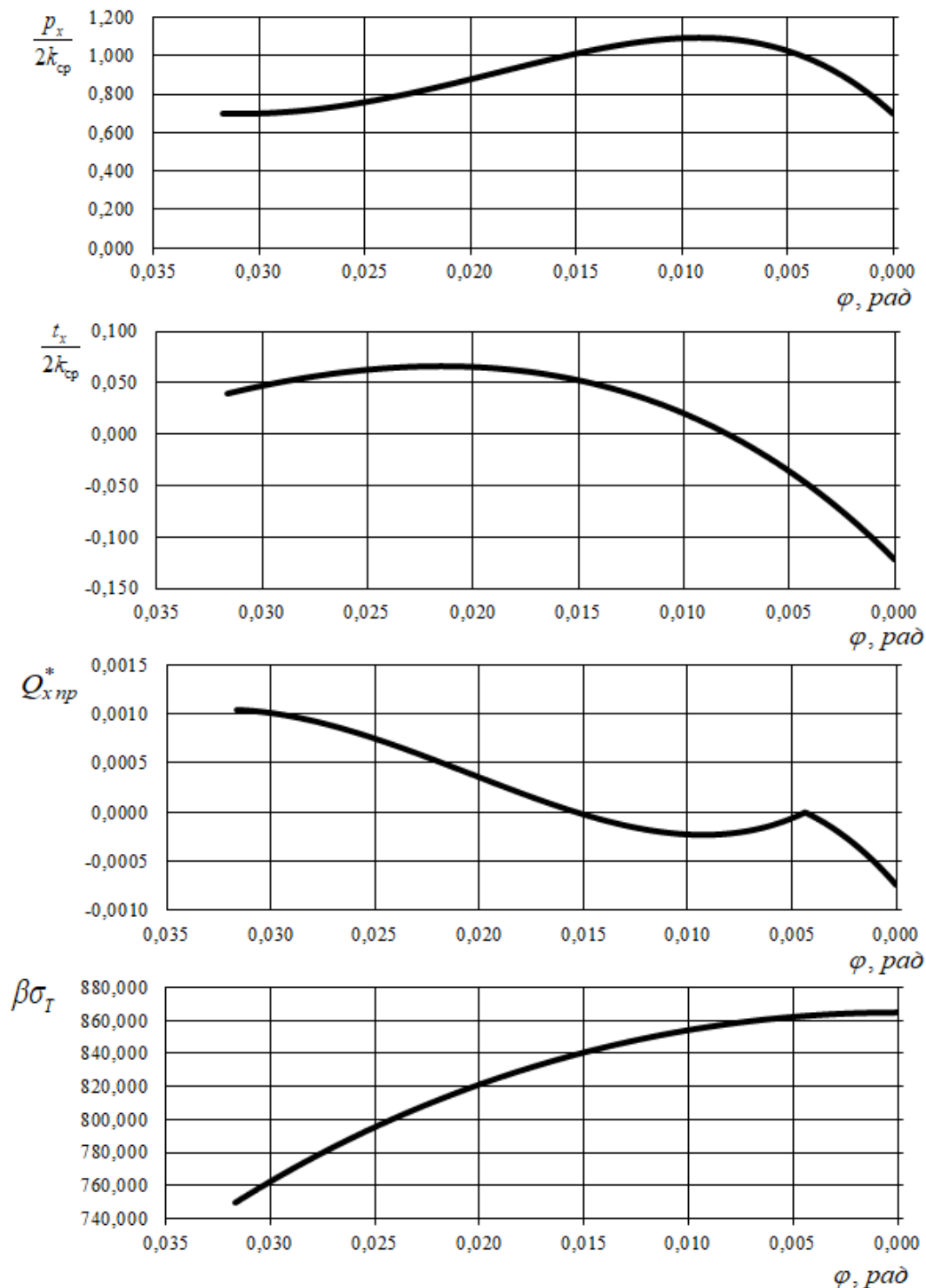


Рисунок 1 – Эпюры распределения нормального давления, удельных сил трения, вынужденного предела текучести металла и продольной силы пластически деформируемого металла при прокатке во второй клетки стана 1680

Из анализа верхней части табл. 2 также следует, что в первом и четвертом проходах процесс совершается устойчиво и для снижения момента без нарушения равновесия металла можно в этих клетях несколько уменьшить коэффициент трения. Расчёты при скорректированных коэффициентах трения приведены в нижней части табл. 2. Рассматривая полученные значения  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$  следует отметить, что продольная устойчивость полосы во всех клетях примерно одинакова. Учитывая, что при принятом режиме деформации границы изменения параметров прокатки ограничены (например коэффициентом трения), то производственный режим натяжений полосы следует признать оптимальным как с точки зрения обеспечения устойчивости процесса, так и в отношении сбережения энергозатрат. Дальнейшее увеличение натяжения полосы, особенно заднего, приведет к потере равновесия полосы в очаге деформации и в конечном счете к пробуксовке.

Таблица 3 – Результаты расчета параметров устойчивости процесса при среднем напряжении текучести в контактной зоне

№ клетки	$q_0$	$q_1$	Расчеты при параметрах прокатки работы [9]							
			Модель трения [8]				Модель Кулона $t_x = f_y p_x$			
			$f_{\text{ср}}$	$Q_{\text{ср.пр.}}^*$	$\gamma$	$\frac{p_{\text{ср}}}{2k_{\text{ср}}}$	$f_y$	$Q_{\text{ср.пр.}}^*$	$\gamma$	$\frac{p_{\text{ср}}}{2k_{\text{ср}}}$
1	0,073	0,303	0,11	-0,0031	0,014	1,8	0,112	-0,0019	0,0191	1,83
2	0,209	0,306	0,054	-0,000078	0,0092	1,01	0,056	+0,00001	0,0117	0,89
3	0,272	0,33	0,053	-0,00012	0,0067	1,06	0,054	+0,00001	0,0089	0,915
4	0,315	0,056	0,08	-0,00071	0,0031	2,0	0,08	-0,0003	0,0037	1,35
№ клетки	$q_0$	$q_1$	Расчеты при скорректированном коэффициенте трения							
1	0,073	0,303	0,0755	-0,00143	0,0132	1,35	0,09	-0,0012	0,0187	1,24
2	0,209	0,306	0,074	-0,00079	0,0093	1,3	0,075	-0,0003	0,0127	1,08
3	0,272	0,33	0,074	-0,00075	0,0069	1,45	0,075	-0,0003	0,0097	1,11
4	0,315	0,056	0,075	-0,00049	0,0028	1,68	0,07	-0,0002	0,0035	1,25

Сравнение опытного безразмерного давления  $p_{\text{ср.оп.}}/2k_{\text{ср}}$  с теоретически полученным  $p_{\text{ср}}/2k_{\text{ср}}$  показывает, что эти параметры достаточно близки при прокатке в первых трех клетях стана.

Наметившееся противоречие между результатами расчетов продольной устойчивости и данными реальной прокатки, на начальном этапе исследования, пытались объяснить не точностью в определении текущего значения напряжения текучести. Поэтому были проведены дополнительные расчеты силы  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$  при усредненном напряжении  $\sigma_T$  по очагу деформации. Результаты этих вычислений представлены в табл. 3. Сравняя данные табл. 2 и 3 неизбежно приходим к выводу, что они достаточно близки. Поэтому и возникла необходимость анализа условий трения на контакте металла с валками.

**Выводы.** Разработана методика оценки продольной устойчивости полосы в очагах деформации при непрерывной прокатке. Выполнен анализ этой устойчивости при прокатке на непрерывном стане 1680 при производстве листа  $0,6 \times 1000$  мм. Показано, что реальный режим натяжения металла между клетями близок к оптимальному как с точки зрения экономии энергозатрат, так по условию продольной устойчивости полосы в валках каждой клетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максименко О. П., Лобойко Д. И., Измайлова М. К. Продольная устойчивость поло-сы в валках с анализом контактных условий : монография / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, М. К. Измайлова. – Днепродзержинск : ДДТУ, 2016. – 212 с.
2. Максименко О. П. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжения полосы / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2009. – № 10. – С. 32–34.
3. Максименко О. П. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжения полосы / О. П. Максименко, М. К. Измайлова, Д. И. Лобойко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 1. – С. 59–63.
4. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев. – М. : СП Интермет Инжиниринг, 1998. – 283 с.
5. Чекмарев А. П. Экспериментальное исследование максимальных углов захвата при установившемся процессе прокатки / А. П. Чекмарев, В. И. Прокофьев, В. П. Галицкий и др. // Обработка металлов давлением : Научные труды, ДМеТи. – М. : Металлургия. – 1967. – Выпуск ЛП. – С. 79–88.
6. Василев Я. Д. Производство полосовой и листовой стали / Я. Д. Василев, М. М. Сафьян. – К. : Вища школа, 1976. – 192 с.
7. Василев Я. Д. Теория продольной прокатки / Я. Д. Василев, А. А. Минаев. – Донецк : УНИТЕХ, 2010. – 456 с.
8. Максименко О. П., Измайлова М. К., Лобойко Д. И. Продольная устойчивость процесса прокатки с натяжением полосы при двухзвенной модели трения в очаге деформации / О. П. Максименко, М. К. Измайлова, Д. И. Лобойко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 4. – С. 73–76.
9. Василев Я. Д. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжения полосы / Я. Д. Василев, Д. В. Коноводов, А. В. Дементиенко, Д. Н. Самокиш, М. И. Завгородний // Обработка металлов давлением. – 2010. – № 2(23). – С. 190–194.
10. Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением [Справочник] / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Г. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.

УДК.621.771.01

МАКСИМЕНКО О. П., д.т.н., профессор  
САМОХВАЛ В. М., к.т.н., доцент  
ЛОБОЙКО Д. І., асистент  
ЛОЦМАН О. М., магістрант

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

### ПОВЕДІНКА МАСТИЛЬНОГО ШАРУ ПІСЛЯ ЙОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ ПРИ ПРОКАТУВАННІ

**Вступ.** При розробці теорії мастильної дії у процесі прокатування гідродинамічним явищам приділена певна увага [1]. Разом із тим, зміні дотичних напружень у часі при русі мастильного шару, а також в'язкості, належного місця в теорії не приділялося, хоча ці питання можуть мати не тільки наукове, але і практичне значення. Наприклад, при холодному прокатуванні, щонайменше, частина технологічного мастила надходить в осередок деформації після попереднього навантаження. Так, у безперервному процесі [2] штаба, захоплена валками наступної кліті, несе на своїй поверхні шар мастила, раніше оброблений тиском у попередній кліті.