

УДК. 621. 771. 01

О. П. МАКСИМЕНКО, Д. И. ЛОБОЙКО

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОСЫ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ С НАТЯЖЕНИЕМ

Предложена методика оценки продольной устойчивости процесса прокатки с натяжением. На основе новой методики по опытным данным был проведен анализ влияния заднего натяжения на продольную устойчивость процесса прокатки. Анализ показал, что с увеличением заднего натяжения результирующая продольных сил по абсолютной величине уменьшается и, следовательно, снижается устойчивость процесса прокатки. Результат работы показывает, что необходимо учитывать величину средней результирующей внутренних сил при назначении режимов натяжения полосы, особенно в случаях непрерывной прокатки.

Ключевые слова: натяжение, продольная устойчивость, очаг деформации, непрерывная прокатка.

Введение. В работе [1] разработана методика оценки продольной устойчивости простого процесса прокатки и предельной захватывающей способности валков, которая связана с определением среднеинтегральной результирующей продольных сил пластически деформируемого металла. Эта результирующая представляет собой силу сопротивления, реакцию на действие внешних сил. Поэтому если продольная результирующая направлена противоположно движению полосы, то прокатка будет устойчивой, без пробуксовок. В случае равенства её нулю – процесс совершается в предельных условиях, а при положительном векторе этой силы (по ходу прокатки) деформация металла становится невозможной. Кроме того, как следует из [1], потеря равновесия полосы в зоне контакта её с валками может возникать при наличии зоны опережения.

Постановка задачи. Разовьем идею о продольной устойчивости процесса на случай прокатки с натяжением полосы. Пусть в этих условиях деформации выполнено численное решение уравнения Т. Кармана и получена эпюра распределения давления по длине очага деформации, имеющая вид, приведенный на рис. 1, б. Заметим, что в сечениях ψ_1 и ψ_2 давление p_x равно среднему сопротивлению деформации $2k$. На входной части очага деформации действует сила заднего натяжения полосы Q_0 и соответственно продольные напряжения натяжения $\frac{\sigma_0}{2k}$, а на выходной – сила переднего полного и

удельных натяжений Q_1 и $\frac{\sigma_1}{2k}$. Выделим текущий объем металла вблизи входа металла в валки ($\alpha - \varphi_1$) (рис. 1, а). Действие отброшенной правой части заменим продольными нормальными напряжениями в безразмерной форме $\frac{\sigma_x}{2k}$. Если процесс является стационарным, то равновесие текущего объема возможно только в том случае, когда напряжения $\frac{\sigma_x}{2k}$ направлены по ходу прокатки. Это направление продольных нормальных напряжений будет неизменным вплоть до сечения ψ_1 . Тогда, в соответствии с уравнением

пластичности, напряжения $\frac{\sigma_x}{2k}$ на участке $\alpha - \psi_1$ будут изменяться так, как показано на рис. 1, в и указанное направление будем считать положительным. Далее рассмотрим участок $\psi_1 - \psi_2$ (рис. 1). Здесь, в соответствии с

уравнением пластичности, напряжения $\frac{\sigma_x}{2k}$ являются сжимающими и направлены против движения полосы, т.е. так, как показано на рис. 1, в.

На участке очага деформации, характеризуемом сечениями $0 - \psi_2$, продольные напряжения существенно зависят от силы переднего натяжения полосы. Как и раньше, выделим текущий объем металла $0 - \varphi_3$, равновесие его возможно,

если $\frac{\sigma_x}{2k}$ будут направлены противоположно движению полосы. Тогда, в целом, эпюра распределения напряжений $\frac{\sigma_x}{2k}$ приобретает вид, показанный на рис. 1, в.

Имея картину распределения продольных нормальных напряжений σ_x нетрудно рассчитать текущие продольные силы пластически деформируемого металла.

$$Q_{x \text{ пр.}} = \sigma_x h_x b,$$

или в безразмерной форме:

$$Q_{x \text{ пр.}}^* = \frac{Q_{x \text{ пр.}}}{2k \cdot R \cdot b} = \frac{\sigma_x}{2k} \left(\frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right). \quad (1)$$

Изменение текущей силы по длине очага деформации приведено на рис. 2.

Имея эпюру изменения текущих продольных сил $Q_{x \text{ пр.}}^*$, нетрудно определить среднеинтегральную результирующую при прокатке полосы с натяжением:

$$Q_{x \text{ пр.}}^{*н} = \frac{1}{\alpha - \psi_1} \int_{\psi_1}^{\alpha} Q_{x \text{ пр.}}^* d\varphi - \frac{1}{\psi_1 - \psi_2} \int_{\psi_2}^{\psi_1} Q_{x \text{ пр.}}^* d\varphi - \frac{1}{\psi_2} \int_0^{\psi_2} Q_{x \text{ пр.}}^* d\varphi. \quad (2)$$

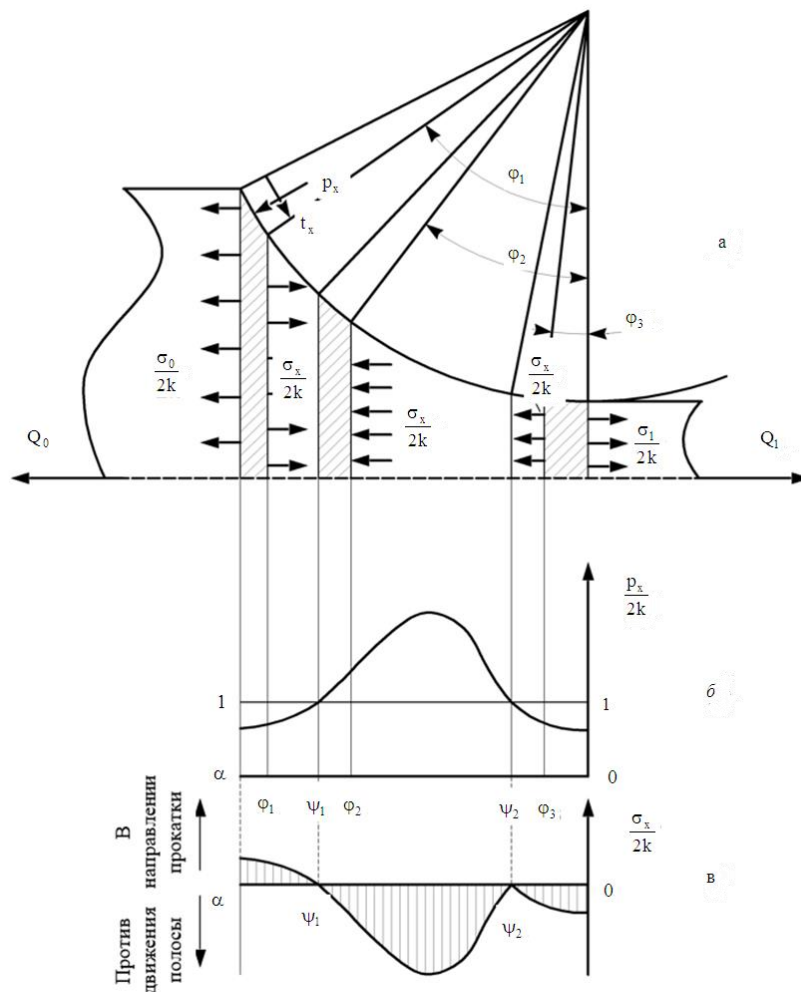


Рис. 1 – Схема очага деформации, распределение давления и продольных напряжений в нем

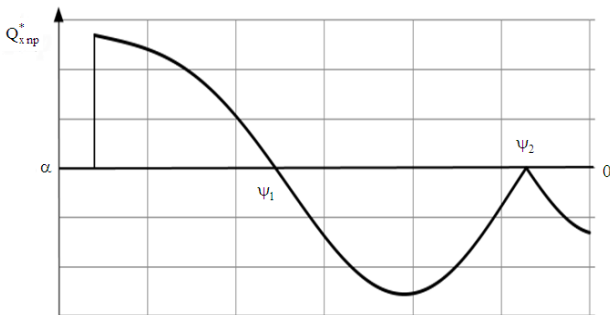


Рис. 2 – Эпюра текущей продольной силы в очаге деформации

Геометрически выражение (2) представляет собой алгебраическую сумму отношений площадей под кривой $Q_{хпр}^*$ на участках $\alpha - \psi_1$; $\psi_1 - \psi_2$ и $\psi_2 - 0$ к длине этих участков (рис. 2). Зная величину и направление действия результирующей $Q_{хпр}^{*н}$, в соответствии с [1], можно дать оценку продольной устойчивости полосы в очаге деформации при прокатке с натяжением. Если эта внутренняя сила направлена противоположно движению полосы, т.е. $Q_{хпр}^{*н} < 0$, то металл в валках будет вести себя устойчиво без потери равновесия. При $Q_{хпр}^{*н} = 0$

процесс будет протекать в предельных условиях. В случаях, когда $Q_{хпр}^{*н} > 0$, т.е. результирующая внутренних сил направлена по ходу прокатки, процесс невозможен.

Результаты работы. Проанализируем конкретные значения продольной результирующей силы при деформации полосы с разным задним натяжением и сравним результаты расчетов с опытными данными, приведенными в [2]. В работе [2] приведены экспериментальные эпюры распределения давления при холодной прокатке стальных образцов высотой 1,95 мм в валках радиусом $R = 124,3$ мм.

При решении дифференциального уравнения Т. Кармана в качестве модели трения была использована функция [3]:

$$\frac{t_x}{2k} = n_2 f \frac{p_x}{2k} + \frac{1}{2} \sin \left[2n_1 \left(\varphi - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \frac{\alpha - \varphi}{\alpha}, \quad (3)$$

где n_1 и n_2 – постоянные коэффициенты при заданных условиях прокатки,

$$n_1 = \left(\frac{2f}{\alpha} \right)^2; \quad n_2 - \text{определяется из граничных}$$

условий на выходе из валков;

φ – текущий угол в очаге деформации;

f – коэффициент трения при упругом транспортировании металла;

α – угол захвата.

Заметим, что f в (3) является условным коэффициентом, и он не равен среднему коэффициенту трения в очаге деформации, полученному как отношение площадей эпюр удельных сил трения и нормального давления:

$$f_{\text{cp}} = \int_{\gamma}^{\alpha} \frac{t_x}{2k} d\varphi + \left| \int_0^{\gamma} \frac{t_x}{2k} d\varphi \right| / \int_0^{\alpha} \frac{p_x}{2k} d\varphi,$$

где γ – угол нейтрального сечения.

Решение осуществляли с применением метода Рунге-Кутты, для чего была составлена программа

Таблица 1 – Режимы обжатий, кинематические и силовые параметры при холодной прокатке стальных образцов

№ фигуры	Высота полосы, мм		$\frac{\sigma_0}{\sigma_{T_0}}$	$\frac{P_{\text{cp}}}{2k}$	l_{cp} , мм	α_{cp} , рад	R_{cp} , мм	v_B , мм/с	f_{cp}	S , %	$Q_{\text{cp пр.}}^*$
	h_0	h_1									
91	1,95	1,32	0,389	1,39	13,92	0,0453	307,6	47	0,121	4,3	-0,002
				1,49						5,2	
92	1,95	1,3	0,674	1,06	13,06	0,0498	262,4	43	0,143	3,5	-0,00063
				1,1						4,6	
95	1,95	1,36	0,0156	1,51	13,86	0,0425	325,6	45	0,106	5	-0,00349
				1,77						5,45	

Примечание: в числителе – опытные данные; в знаменателе – расчетные.

Анализ изменения текущей продольной силы $Q_{\text{хпр.}}^*$ для образца №91 по длине очага деформации показывает, что вблизи входа металла в валки эта сила положительная, направлена по ходу прокатки. Далее она меняет свое направление. Причем площадь под кривой отрицательных значений $Q_{\text{хпр.}}^*$ больше положительных, т.е. $Q_{\text{cp пр.}}^* < 0$ и равна - 0,002, следовательно, в данных условиях деформации процесс прокатки образца совершался устойчиво без частичных пробуксовок, что подтверждают результаты опыта. Обратим внимание на то, что опытные и расчетные значения среднего давления $\frac{P_{\text{cp}}}{2k}$ и опережения S достаточно близки (табл. 1).

Аналогичные расчеты были проведены и для остальных образцов приведенных в табл. 1. Для анализа из [2] были выбраны образцы, которые прокатывались по близкому режиму обжатия, но с разной величиной заднего натяжения. Сравнительные результаты приведены на рис. 4. Из

расчета на ЭВМ. Для случая прокатки стального образца 91 (номер фигуры 91) [2] результаты расчета эпюр распределения нормального давления, удельных сил трения и текущей продольной силы пластически деформированного металла приведены на рис. 3. Образец прокатывался со значительным

задним натяжением полосы $\frac{\sigma_0}{\sigma_{T_0}} = 0,389$

(σ_{T_0} – напряжение текучести на входе в очаг деформации). Параметры деформации, некоторые результаты опытов и расчетов приведены в табл. 1.

этого рисунка видно, что с увеличением заднего удельного натяжения полосы средняя результирующая продольных сил $Q_{\text{cp пр.}}^*$ по абсолютной величине уменьшается, следовательно, уменьшается и продольная устойчивость процесса прокатки. Об этом можно судить и по опытному опережению S . Важно отметить, что одним из ограничений на величину натяжения полосы при прокатке может быть продольная устойчивость металла в валках. Это обстоятельство необходимо особо учитывать при непрерывной прокатке листовой стали.

Выводы. Разработан метод оценки продольной устойчивости полосы в очаге деформации при прокатке с натяжением. Показано, что с увеличением заднего натяжения результирующая продольных сил по абсолютной величине уменьшается и, следовательно, снижается устойчивость процесса прокатки. Последнее необходимо учитывать при назначении режимов натяжения полосы, особенно в случаях непрерывной прокатки.

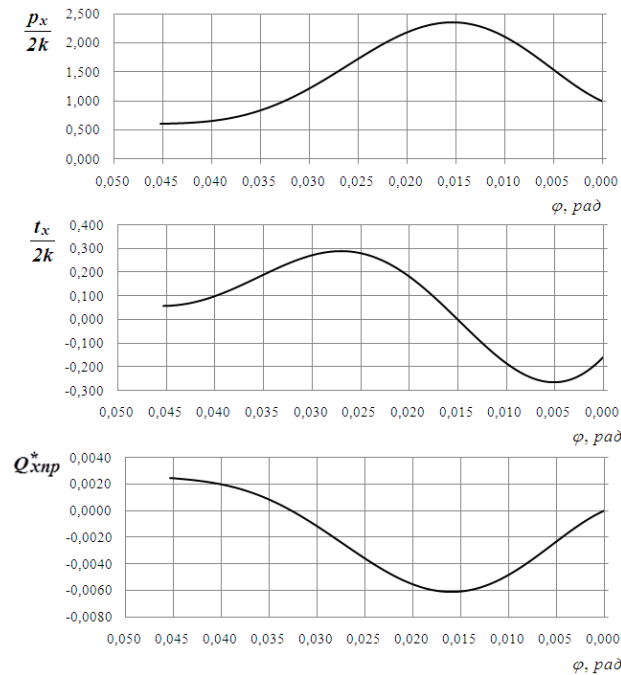


Рис. 3 – Эпюры распределения нормального давления, удельных сил трения и текущей продольной силы пластически деформируемого металла для образца №91

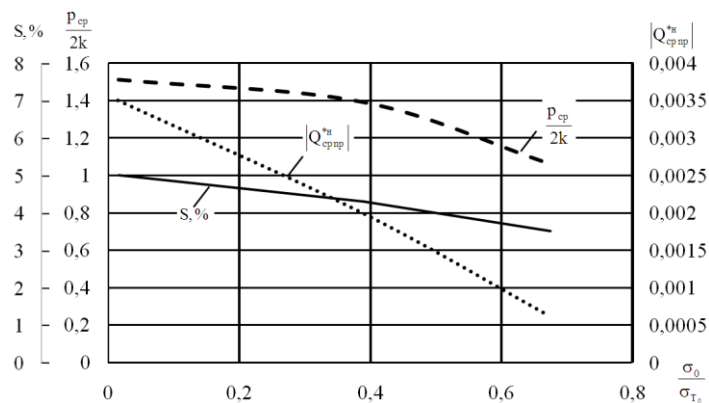


Рис. 4 – Влияние заднего натяжения полосы на некоторые параметры прокатки

Список литературы: 1. Максименко О. П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, Р. Я. Романюк // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2013. – №6. – С. 47–49. 2. Королев А. А. Новые исследования деформации металла при прокатке / А. А. Королев. – М. : Машгиз, 1953. – 267 с. 3. Максименко О. П. Продольная устойчивость процесса прокатки с натяжением полосы при двухзвенной модели трения в очаге деформации / О. П. Максименко, М. К. Измайлова, Д. И. Лобойко. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2015. – №4. – С. 59–62.

Bibliography (transliterated): 1. Maksimenko O. P., D. I. Loboiko and R. Ja. Romanjuk. “Analiz silovogo vzaimodejstija v ochage deformacii pri prokatke”. *Metallurg. i gornorud. prom-st’*. No.6. 2013. 47–49. Print. 2. Korolev A. A. *Novye issledovanija deformacii metalla pri prokatke. Moscow. : Mashgiz, 1953. Print.* 3. Maksimenko O. P., M. K. Izmajlova and D. I. Loboiko. “Prodol'naja ustojchivost' processa prokatki s natjazheniem polosity pri dvuhzvennoj modeli trenija v ochage deformacii”. *Metallurg. i gornorud. prom-st’*. No.4. 2015. 59–62. Print.

Поступила (received) 02.11.2015

Сведения об авторах / About the Authors

Максименко Олег Павлович, доктор технических наук, профессор, кафедры Обработки металлов давлением Днепропетровского государственного технического университета, тел. (097)677-63-79.

Maksimenko Oleg Pavlovich, Ph.D., Professor, Dneprodzerzhinsk State Technical University, tel. 8(097)677-63-79.

Лобойко Дарья Игоревна, Днепропетровский государственный технический университет, аспирант, тел. (097)497-6083, e-mail: darloboiko@gmail.com

Loboiko Daria Igorevna, Dneprodzerzhinsk State Technical University, Postgraduate student, tel. (097) 497-60-83, e-mail: darloboiko@gmail.com