

3. Прокатные станы: справочник в 3-х томах. Листопрокатные станы и профилирующие агрегаты / [В.Г.Антипин, Д.К.Нестеров, Кизиев В.Г. и др.]. – М. Металлургия, 1992. – Т. 3. – 429с.
4. Кузнецов Л.А. Применение УВМ для оптимизации тонколистовой прокатки / Л.А.Кузнецов. – М.: Металлургия, 1988. – 304с.
5. Романюк Р.Я. Підвищення поздовжньої сталості процесу тонколистової прокатки на основі розвитку теоретичних положень щодо контактної взаємодії полоси з валками: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.05 „Процеси та машини обробки тиском” / Р.Я.Романюк. – Дніпропетровськ, 2012. – 19с.

Надійшла до редколегії 30.05.2013.

УДК 621.771.0

МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., професор  
ИЗМАЙЛОВА М.К., к.т.н, доцент  
ПОНОМАРЕНКО А.С., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

### К ВОПРОСУ О БАЛАНСЕ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ

**Введение.** При оценке захватывающей способности валков в теории прокатки рассматривается соотношение между втягивающими металл в очаг деформации и выталкивающими контактными силами. Условия захвата в установившемся процессе также зависят от режима натяжения полосы, особенно в тех случаях, когда заднее натяжение больше переднего. Как показывает исследование [1], наряду с указанными силами в очаге деформации действует результирующая продольных сил пластически деформируемого металла. Эта средняя результирующая является силой сопротивления продольному течению металла. Кроме того, при высокоскоростной стационарной прокатке возможно возникают значительные динамические силы по причине нарастания скорости частиц металла в очаге деформации. Они также направлены против хода прокатки.

**Постановка задачи.** Цель настоящего исследования заключается в количественной оценке вышеперечисленных сил сопротивления по отношению к общему балансу горизонтальных сил в зоне контакта полосы с валками. Как известно, силы трения, действующие в зоне опережения,  $T_{оп}$  представляют собой резерв для дальнейшего увеличения угла захвата. Поэтому определим соотношение между запасом  $T_{оп}$  и выше указанными силами сопротивления.

**Результаты работы.** Используя методику [1], рассчитаем среднюю результирующую продольных сил пластически деформируемого металла  $Q_{\delta}^*$  для случая прокатки относительно тонкой полосы, когда при расчете контактных напряжений правомерно воспользоваться дифференциальным уравнением равновесия Т.Кармана. Пусть прокатка ведется в валках радиусом  $R=100$  мм, угол захвата равен  $\alpha_y = 0,17$  рад., коэффициент трения составляет  $f_y = 0,2$ , конечная толщина полосы  $h_1 = 3,75$  мм и параметр формы  $\frac{l_d}{h_{\delta}} = 3,27$ . При заданных условиях деформации считаем контактные напряжения и определим текущую продольную силу:

$$Q_{x\dot{\delta}} = \sigma_x h_x b$$

или в безразмерном виде:

$$Q_{x\dot{\delta}}^* = \frac{Q_{x\dot{\delta}}}{2kRb} = \frac{Q_x}{2k} \left( \frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_x$  – продольные нормальные напряжения;

$2k$  – сопротивление металла пластической деформации;

$\varphi$  – текущий угол в очаге деформации;

$b$  – ширина полосы.

Результаты расчета представлены графиками на рис.1.

Как видно, текущая сила  $Q_{x\dot{\delta}}^*$  на границах очага деформации принимает нулевое значение, а в остальных сечениях является сжимающей, направленной против хода прокатки. Среднее результирующее значение этой силы равно

$$Q_{\dot{\delta}}^* = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_{x\dot{\delta}}^* d\varphi = 0,00526.$$

На преодоление  $Q_{\dot{\delta}}^*$  требуется дополнительная энергия контактных втягивающих сил, что вызывает сокращение зоны опережения. Резерв сил трения в зоне опережения

$T_{\dot{\delta}}^* = \frac{T_{\dot{\delta}}}{2kRb}$  определим непосредственно по эпюре контактных касательных напряжений. Этот запас при указанных условиях прокатки составляет:  $T_{\dot{\delta}}^* = 0,014$ . Тогда отношение

$\frac{Q_{\dot{\delta}}^*}{2T_{\dot{\delta}}^*} = 36,9\%$ .

Таким образом, средняя результирующая продольных сил пластически деформируемого металла составляет значительную долю от резерва сил трения в зоне опережения и в общем балансе продольных сил, действующих в очаге деформации, ее необходимо учитывать.

Оценим динамическую составляющую продольных сил при стационарном процессе прокатки. Как известно, общее ускорение частицы металла в очаге деформации определяется следующим способом [2]:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z}.$$

В случае стационарного процесса  $\frac{\partial v_x}{\partial t} = 0$ . Тогда при прокатке относительно широкой и тонкой полосы можно принять

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = v_x \frac{\partial v_x}{\partial x},$$

и в первом приближении среднее ускорение металла в очаге деформации будет:

$$a_{\dot{\delta}} = \frac{v_1 - v_0}{t} = \frac{(v_1 - v_0)v_{\dot{\delta}}}{l_{\dot{\delta}}}, \quad (2)$$

где  $v_0, v_1$  – скорость полосы при входе в очаг деформации и при выходе из него;  
 $v_{\dot{a}}$  – линейная скорость вращения валков;  
 $t$  – время прохождения частицы металла через очаг деформации;  
 $l_{\ddot{u}}$  – длина сплющенного очага деформации.

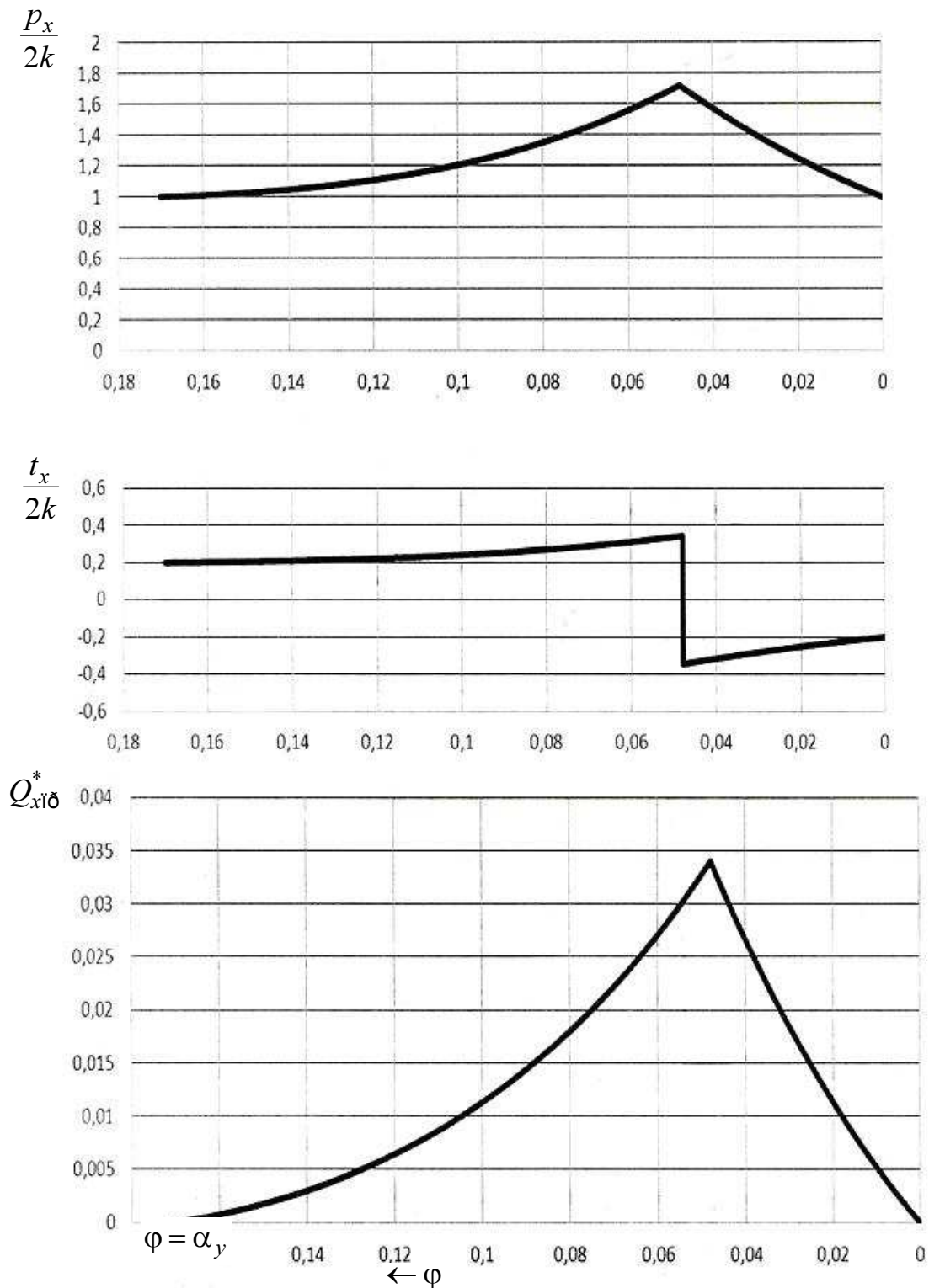


Рисунок 1 – Распределение контактных напряжений и текущей продольной силы в очаге деформации

В результате динамическую силу, возникающую за счет ускорения частиц металла в зоне контакта полосы с валками при стационарном процессе, можно определить так:

$$F_{\ddot{a}e\dot{i}} = \rho \frac{h_0 + h_1}{2} l_{\ddot{n}i} b \frac{1}{g} \frac{v_1 - v_0}{l_{\ddot{n}i}} v_{\dot{a}}$$

или в безразмерном виде

$$F_{\ddot{a}e\dot{i}}^* = \frac{F_{\ddot{a}e\dot{i}}}{2kRb}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность металла;

$g$  – ускорение свободного падения.

Оценим значимость каждой из названных выше выталкивающих сил ( $Q_{\ddot{n}\delta\dot{i}\delta}^* ; Q_i^* = \frac{\sigma_0 h_0 - \sigma_1 h_1}{2kR}$  – безразмерная результирующая сил натяжения и  $F_{\ddot{a}e\dot{i}}^*$ ) по отношению к резерву сил трения в зоне опережения при прокатке жести на стане 1400 [3].

Исходные данные, необходимые для расчета контактных напряжений, приведены в табл.1, где  $l_{\ddot{n}i}$  и  $\alpha_{\ddot{n}i}$  – сплюснутая длина очага деформации и угла захвата;  $P$  – сила прокатки;  $p_{\ddot{n}\delta}$  – среднее давление металла на валки.

Таблица 1 – Геометрические, кинематические и силовые параметры при прокатке жести размерами 0,22x890 мм на стане 1400

Номер клетки	Толщина, мм		Удельное натяжение		$f_y$	$P, \text{ Мн}$	$p_{\ddot{n}\delta}, \text{ МПа}$	$l_{\ddot{n}i}, \text{ мм}$	$\alpha_{\ddot{n}i}$	Скорость, м/с	
	$h_0$	$h_1$	$\frac{\sigma_0}{2k}$	$\frac{\sigma_1}{2k}$						$v_0$	$v_1$
1	2,4	2,11	0,091	0,15	0,075	6,4	609	11,8	0,0246	2,8	3,18
2	2,11	1,29	0,15	0,18	0,07	9,4	717	14,7	0,0558	3,18	5,2
3	1,29	0,79	0,18	0,22	0,06	9,22	781	13,2	0,0379	5,2	8,5
4	0,79	0,49	0,22	0,25	0,05	8,95	835	12,0	0,025	8,5	13,7
5	0,49	0,345	0,25	0,26	0,05	8,39	943	10,0	0,0145	13,7	19,5
6	0,345	0,22	0,26	0,1	0,05	9,98	1108	10,0	0,0124	19,5	30,6

Ввиду того, что процесс прокатки во всех клетях совершается устойчиво и качественная картина распределения контактных напряжений и текущей силы  $Q_{x\dot{i}\delta}^*$  подобна, на рис.2 приведено изменение этих величин по длине очага деформации полосы для второй клетки. Заметим, что на участке зоны контакта полосы с валками, характеризующимся текущим углом  $\varphi < 0,01$ , напряжения  $\sigma_x$  изменяют свое направление в результате действия переднего натяжения. Поэтому на этом участке текущая сила  $Q_{x\dot{i}\delta}^*$  является растягивающей и способствует процессу прокатки. Результаты расчета относительных выталкивающих сил  $\frac{Q_{\ddot{n}\delta\dot{i}\delta}^*}{2T_{\ddot{n}}^*}, \frac{Q_i^*}{2T_{\ddot{n}}^*}, \frac{F_{\ddot{a}e\dot{i}}^*}{2T_{\ddot{n}}^*}$  приведены в табл.2.

Анализ приведенных в табл.2 расчетных данных показывает, что результирующая сил натяжения  $Q_i^*$  направлена в сторону прокатки только в первой клетке, в осталь-

$$Q_{cp}^* = 0,00008$$

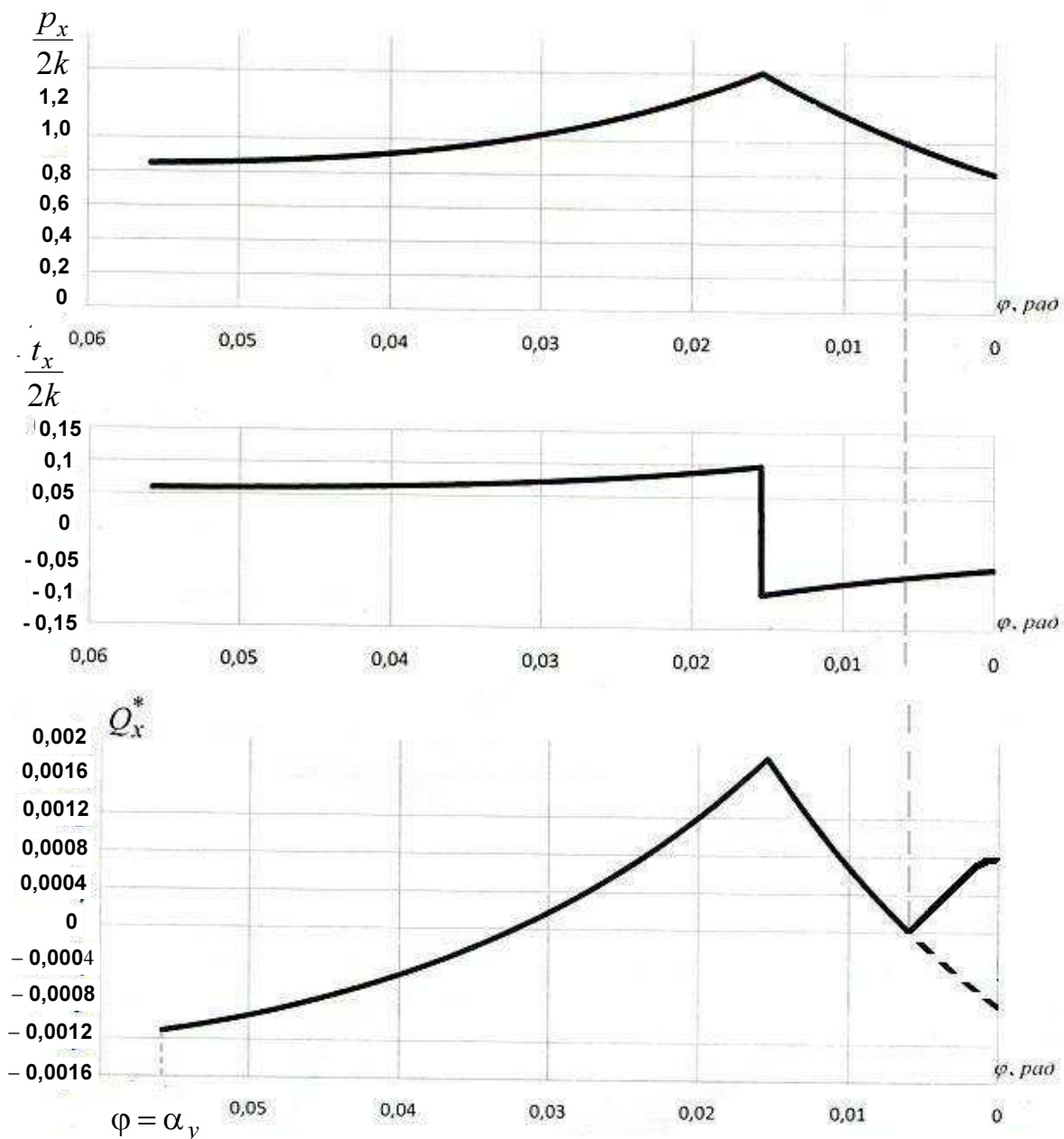


Рисунок 2 – Эпюры контактных напряжений и текущей продольной силы при прокатке во второй клетки стана 1400

ных клетях ее необходимо преодолевать втягивающим силам. Отношение  $\frac{Q_i^*}{2T_{ii}^*}$  по клетям стана 1400 изменяется от 11% до 33% и при оценке продольной устойчивости процесса результирующую сил натяжения необходимо учитывать. Результирующая продольных сил пластически деформируемого металла  $Q_{\dot{n}\dot{\delta}\dot{\delta}}^*$  во всех клетях направлена противоположно к движению полосы, что подтверждает устойчивый характер прокатки. Отношение этой силы к резерву сил трения в зоне опережения по клетям

стана 1400 колеблется от 6,9% до 21,8%, что указывает на значительность силы  $Q_{\dot{n}\dot{\delta}\dot{\delta}}^*$ .

Таблица 2 – Расчеты средних значений выталкивающих из очага деформации сил в клетях стана 1400

Но- мер кле- ти	$a_{\dot{n}\dot{\delta}} \cdot 10^3$ м/с <sup>2</sup>	$2k$ , МПа	$Q_{\dot{n}\dot{\delta}\dot{\delta}}^*$ $10^{-3}$	$Q_i^*$ $10^{-3}$	$F_{\dot{a}\dot{e}\dot{i}}^*$ $10^{-5}$	$2T_{\dot{i}\dot{i}}^*$ $10^{-2}$	$\frac{Q_{\dot{n}\dot{\delta}\dot{\delta}}^*}{2T_{\dot{i}\dot{i}}^*}$ , %	$\frac{Q_i^*}{2T_{\dot{i}\dot{i}}^*}$ , %	$\frac{F_{\dot{a}\dot{e}\dot{i}}^*}{2T_{\dot{i}\dot{i}}^*}$ , %
1	0,1	290	0,16	-0,33	0,025	0,16	15	20,3	0,015
2	0,69	350	0,56	0,28	0,13	0,19	8,2	14,4	0,07
3	2,06	405	0,38	0,19	0,16	0,17	8,2	11,1	0,08
4	5,8	490	0,34	0,17	0,23	0,09	6,7	18,9	0,26
5	11,08	580	0,22	0,11	0,25	0,056	7,1	19,6	0,4
6	31,8	672	0,46	0,23	0,37	0,055	21,8	33,5	0,67

Несмотря на то, что ускорение частиц металла в очаге деформации значительно, возникающие в очаге деформации динамические силы при стационарном процессе весьма малы, меньше одного процента от резерва сил трения  $2T_{\dot{i}\dot{i}}^*$ .

**Выводы.** При оценке продольной устойчивости прокатки жести на стане 1400 необходимо учитывать результирующую сил натяжения и среднюю по очагу деформации продольную силу пластически деформируемого металла. Динамическими силами  $F_{\dot{a}\dot{e}\dot{i}}^*$ , ввиду их малости, можно пренебречь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Максименко О.П. Анализ продольных условий прокатки с учетом продольных сил пластически деформируемого металла / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА. – 2012. – № 4 (33). – С.60-64.
2. Седов Л.И. Механика сплошной среды / Л.И.Седов. – М.: Наука, 1970. – Т.1 – 492с.
3. Василев Я.Д. Производство жести методом двойной прокатки / Я.Д.Василев, А.В.Дементченко, С.Г.Горбунов. – М.: Металлургия, 1994. – 124с.

Поступила в редколлегию 30.05.2013.