

4. Чекмарев А.П. Анализ процесса прокатки по данным распределения контактных напряжений / А.П.Чекмарев, П.Л.Клименко // Теоретические проблемы прокатного производства. Теория прокатки: Всесоюзн. науч.-техн. конф., 1975 г.: материалы / под ред. А.П.Чекмарева. – М.: Металлургия, 1975. – С.33-37.
5. Клименко П.Л. Контактное напряжение при прокатке с технологической смазкой / П.Л.Клименко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: Сучасні технології. – 2005. – С.44-49.

Поступила в редколлегию 18.12.2017.

УДК.621.771.01

МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., профессор
ЛОБОЙКО Д.И., зав. лабораторией
МАРЧЕНКО К.К., аспирант
ПУСТОВА С.Ю., магистр

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ В КОМПЛЕКСЕ ПРИВОДНЫХ И НЕПРИВОДНОЙ КЛЕТЕЙ

Введение. В работах [1-3] опубликованы результаты исследования процесса прокатки в блоке клетей, включающем неприводную. Такой процесс обеспечивается запасом сил трения в смежных приводных клетях. В указанных исследованиях дана оценка энергоэффективности процесса в комплексе с неприводной клетью, а также проанализировано влияние трения в опорах холостых валков на энергосиловые параметры. При непрерывной прокатке с натяжением или подпором полосы важно обеспечить продольную устойчивость металла, чтобы предотвратить возможные случаи частичной или полной пробуксовки его в валках.

Постановка задачи. В связи с этим, целью данного исследования является выполнение теоретического анализа процесса прокатки в комплексе, состоящем из трех клетей, средняя из которых является неприводной.

Результаты работы. Продольную устойчивость полосы в валках каждой клетки оценивали по величине и направлению действия средней результирующей $Q_{ср.пр.}^*$ внутренних горизонтальных сил пластически деформируемого металла. Методика определения силы $Q_{ср.пр.}^*$ приведена в публикациях [4-6]. Заметим, что эта результирующая является силой сопротивления, реакцией на действие контактных напряжений и поэтому активную роль в процессе деформации полосы играть не может. В связи с отмеченным, прокатка металла в очаге деформации будет устойчивой, если $Q_{ср.пр.}^* < 0$. При $Q_{ср.пр.}^* = 0$ процесс совершается в предельных условиях. В случае, если эта сила направлена по движению полосы, процесс невозможен.

Теоретический анализ проводили на примере прокатки в первых трех клетях черновой группы среднесортного стана 400/200 ДМКД. Предположим, что средняя клеть этого комплекса является неприводной. Граничные условия при сравнении затрат энергии в случае обычной прокатки и с применением неприводной клетки были одинаковыми, т.е. $q_{01_n} = q_{01_n}$ и $q_{13_n} = q_{13_n}$.

$$q_{01_n} = \frac{\sigma_{01_n}}{2k_{cp1}}; q_{01_n} = \frac{\sigma_{01_n}}{2k_{cp1}}; q_{13_n} = \frac{\sigma_{13_n}}{2k_{cp3}}; q_{13_n} = \frac{\sigma_{13_n}}{2k_{cp3}}, \quad (1)$$

где σ_{01_n} и σ_{01_n} – заднее удельное натяжение в первой клетке при наличии в комплексе неприводной клетки и при прокатке в обычных условиях;

σ_{13_n} и σ_{13_n} – переднее удельное натяжение в третьей клетке в обоих случаях прокатки;

$2k_{cp}$ – среднее сопротивление деформации металла.

Геометрические параметры деформации приведены в табл.1.

Таблица 1 – Геометрические параметры прокатки

Номер клетки	Толщина полосы, мм		Абсолютное обжатие Δh , мм	Радиус валков R, мм	Угол захвата α , рад	$\frac{l_d}{h_{cp}}$	Ширина полосы, мм		
	h_0	h_1					b_0	b_1	b_{cp}
1	160	111,5	48,5	325	0,3863	0,92	160	172,5	~166
2	172,5	123	49,5	325	0,3903	0,86	111,5	126	~119
3	126	80	46	325	0,3762	1,19	123	136	~130

Методика оценки продольной устойчивости основана на численном решении уравнения Т.Кармана при режиме трения в виде модели Кулона (могут быть и другие).

В результате получены эпюры контактного давления $\frac{P_x}{2k_{cp}}$ и удельных сил трения

$\frac{t_x}{2k_{cp}}$. Далее из уравнения пластичности находили распределение продольных нор-

мальных напряжений $\frac{\sigma_x}{2k_{cp}}$. Умножая это напряжение на текущую площадь попереч-

ного сечения полосы, определяли продольную силу $Q_{хпр}$ (в безразмерной форме

$Q_{хпр}^* = \frac{Q_{хпр}}{2k_{cp}Rb_{cp}}$) и рассчитывали её результирующее среднеинтегральное по очагу деформации значение:

$$Q_{cp.пр.} = \frac{1}{l_d} \int_0^\alpha Q_{хпр} R d\varphi \quad (2)$$

или в безразмерной форме

$$Q_{cp.пр.}^* = \frac{1}{l_d} \int_0^\alpha Q_{хпр}^* R d\varphi. \quad (3)$$

В расчетах принимаем, что момент прокатки в очаге деформации неприводной клетки равен нулю ($M_n = 0$), а коэффициенты трения в установившемся режиме в приводных клетях равны $f_{y_n} = 0,35$, в неприводной – $f_{y_n} = 0,3$. Результаты вычисления приведены на рис.1-3, сплошными линиями показаны эпюры в случае прокатки во всех приводных клетях, штриховыми – когда средняя клетка является неприводной. В табл.2

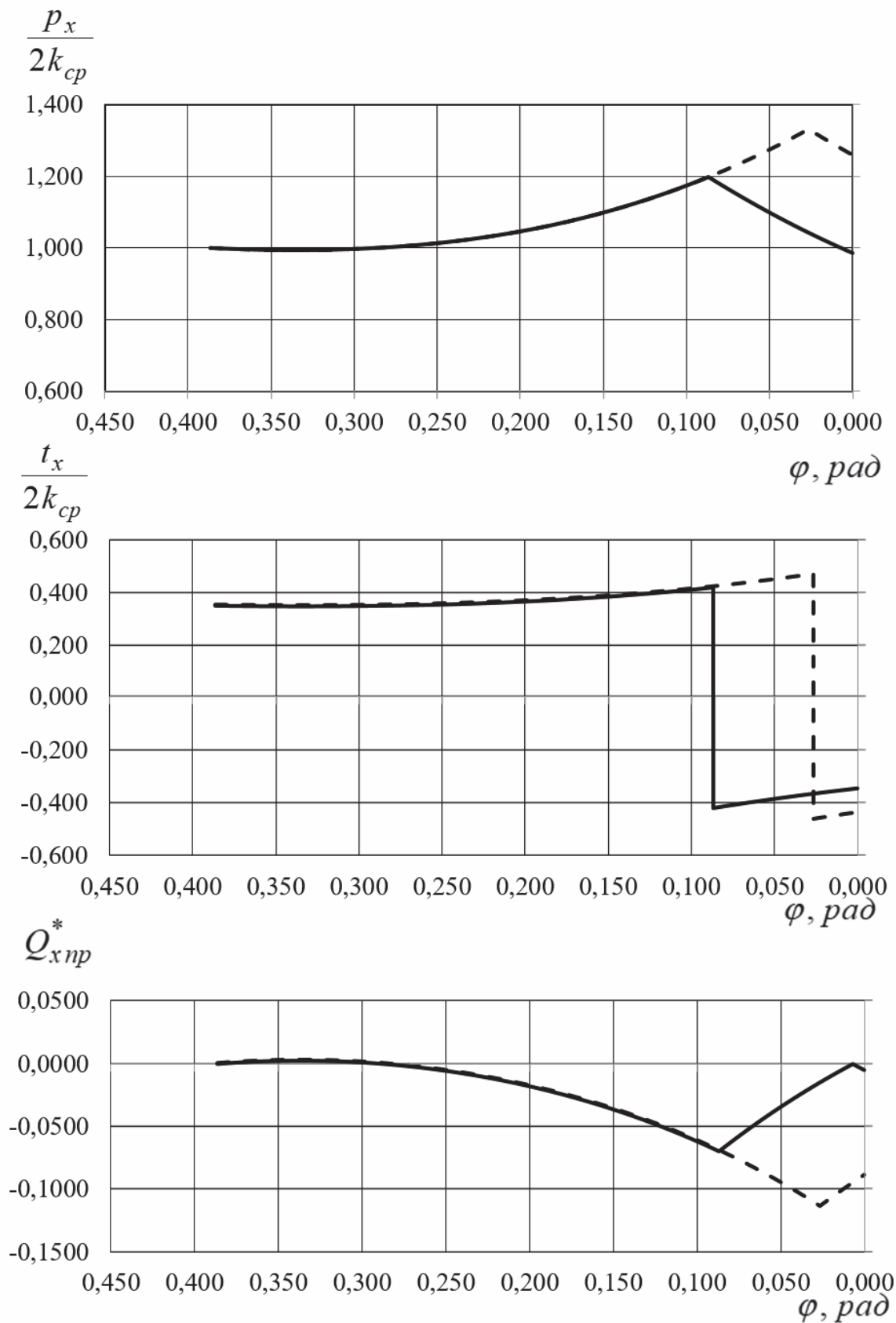


Рисунок 1 – Распределение контактных напряжений и текущих продольных сил при прокатке в первой клетке

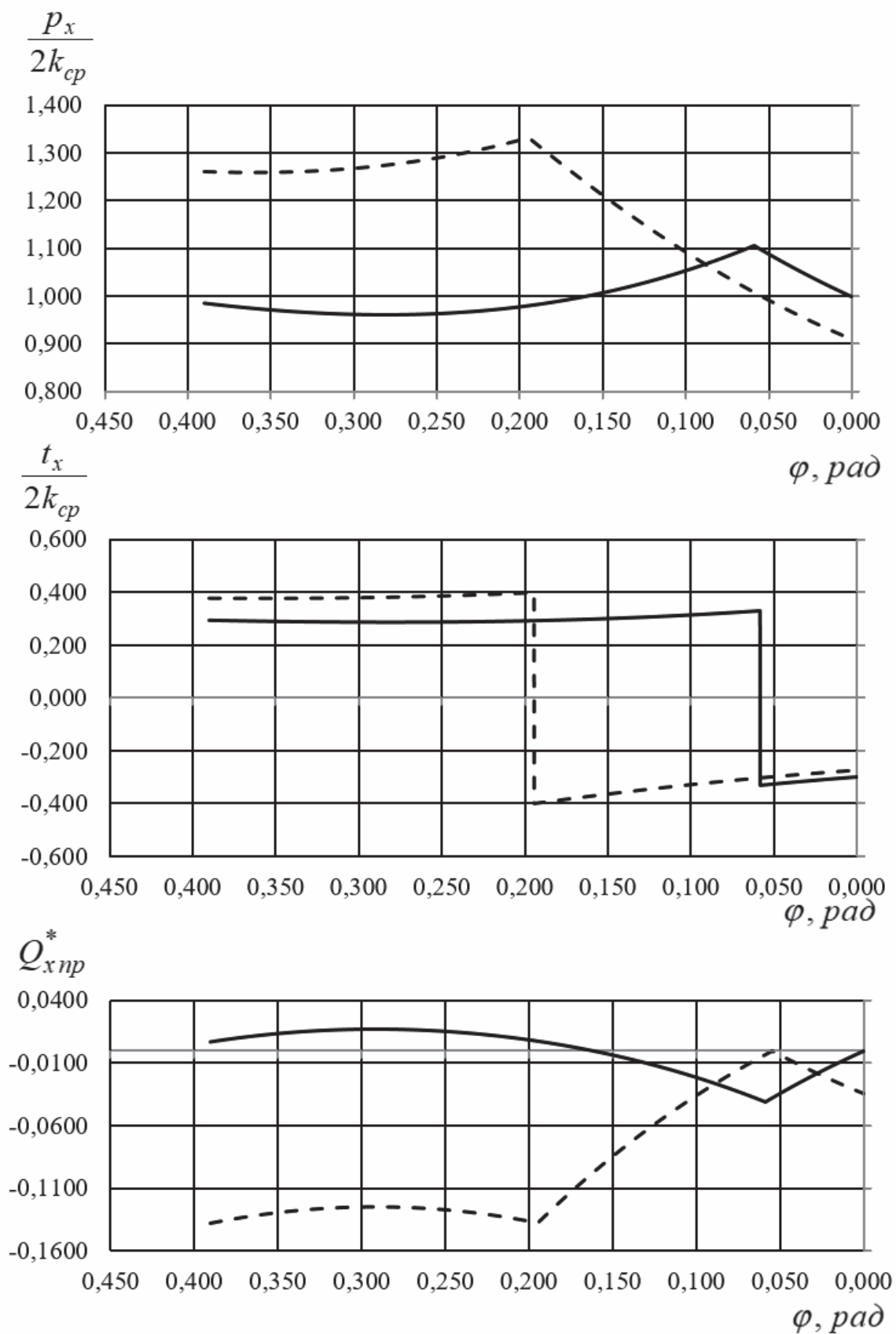


Рисунок 2 – Распределение контактных напряжений и текущих продольных сил при прокатке во второй клетки

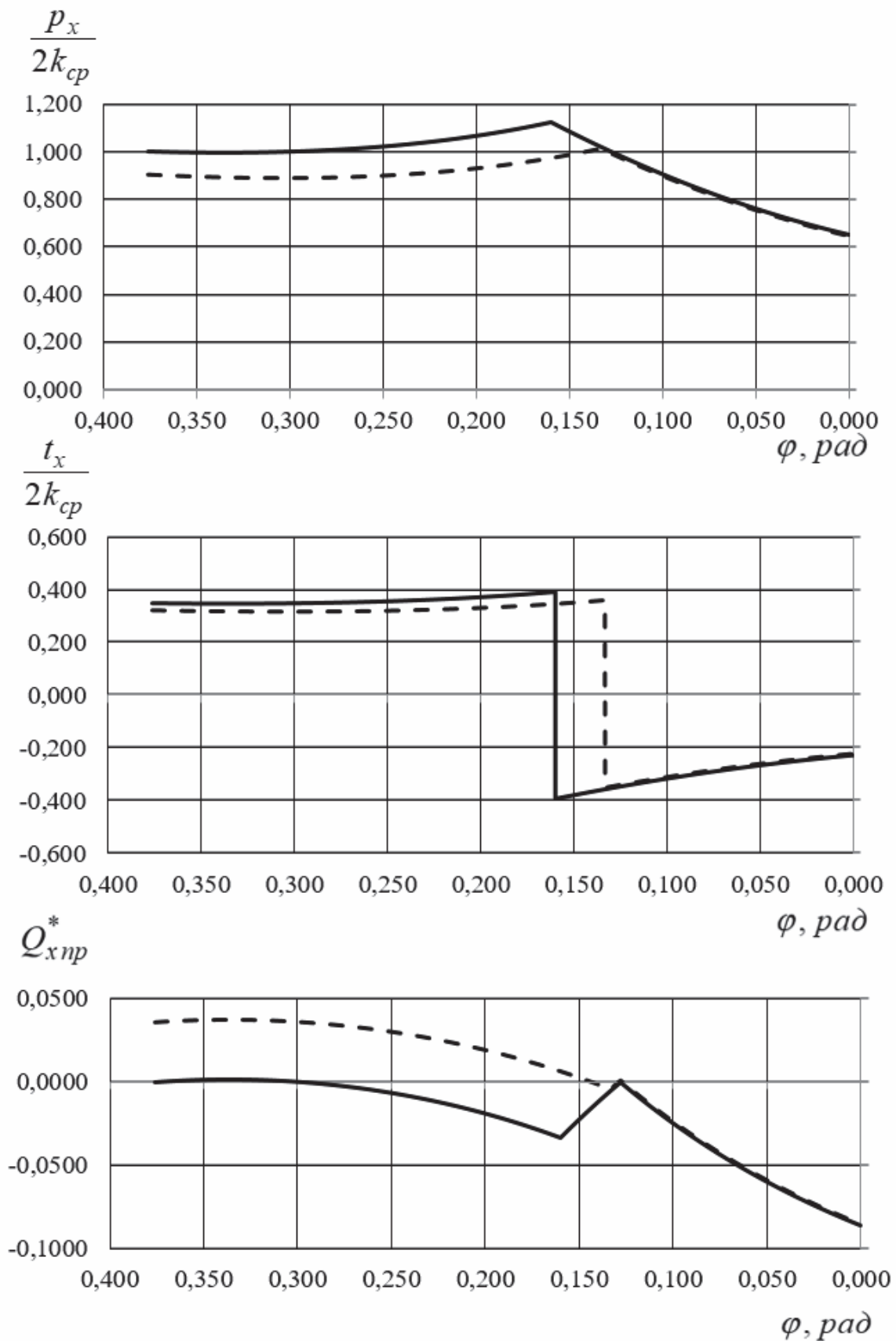


Рисунок 3 – Распределение контактных напряжений и текущих продольных сил при прокатке в третьей клетки

приведены сведения, полученные на основе обработки указанных эпюр, из которой следует, что теоретически в обоих случаях прокатки процесс протекает устойчиво без частичных пробуксовок, т.к. в каждой клетке $Q_{cp.np}^* < 0$. В обоих случаях деформации $q_{01} = 0$, а $q_{13} = 0,35$. В комплексе с одной неприводной клетью задний подпор составлял $q_{02} = -0,26$, а переднее натяжение $q_{12} = 0,09$. Прокатку во всех приводных клетях осуществляли с натяжением полосы. Моменты в очагах деформации рассчитывали, исходя из эпюр распределения удельных сил трения:

$$M = 2 \int_0^{\alpha} t_x R^2 b_{cp} d\varphi \quad (4)$$

или в безразмерной форме

$$M^* = \frac{M}{2k_{cp}R^2b_{cp}} = 2 \int_0^{\alpha} \frac{t_x}{2k_{cp}} d\varphi. \quad (5)$$

Таблица 2 – Напряжения, силы и моменты прокатки

№№ п/п	Параметры	Номер прокатной клетки		
		I	II	III
1	q_{0i}	0/0	-0,26/0,014	0,09/0
2	q_{1i}	-0,26/0,014	0,09/0	0,35/0,35
3	$Q_{cp.np}^*$	-0,0341/-0,0199	-0,0895/-0,0001	-0,0004/-0,0223
4	$\frac{P_{cp}}{2k_{cp}}$	1,097/1,06	1,19/1,004	0,885/0,95
5	M	0,255/0,157	0/0,164	0,068/0,038
6	$\gamma, \text{рад}$	0,027/0,087	0,195/0,059	0,133/0,16
7	f_{np} и f_n	0,35/0,35	0,3/0,3	0,35/0,35

Примечание: i – номер клетки; γ – угол нейтрального сечения;
 в числителе параметры комплекса клеток с одной неприводной;
 в знаменателе параметры в случае прокатки со всеми приводными клетями

Суммарный момент по трем приводным клетям составил $\sum M_n^* = 0,359$, а в комплексе со средней неприводной клетью – $\sum M_n^* = 0,323$. Как видно, суммарный момент в первом случае примерно на 7,2% больше, чем в комплексе со средней неприводной клетью. Очевидно, что, с точки зрения экономии энергозатрат, прокатка в указанном комплексе более эффективна, хотя при этом существенно возрастает загруженность первой клетки, более чем в 1,6 раза. Такое соотношение в моментах, по-видимому, связано с перераспределением втягивающих сил трения в блоке с неприводной клетью.

Далее сравним моменты $\sum M^*$ при разных коэффициентах трения в контакте металла с неприводными валками. Результаты расчетов приведены в табл.3, из которой видно, что при $f_n = 0,25$ суммарный момент по трем клетям $\sum M^* = 0,252 + 0 + 0,034 = 0,286$ несколько меньше по сравнению с тем случаем, когда

коэффициент трения $f_H = 0,4$ ($\sum M^* = 0,266 + 0 + 0,034 = 0,3$). Следует также отметить, что при большем коэффициенте трения в контакте неприводных валков с полосой продольная устойчивость металла в первой и второй клетях значительно выше, чем при $f_H = 0,25$.

Таблица 3 – Влияние коэффициента трения в очаге деформации неприводной клетки на суммарный момент прокатки

№№ п/п	Параметры	Прокатные клетки		
		I	II	III
1	q_{0i}	0/0	-0,245/-0,254	0,102/0,102
2	q_{1i}	-0,245/-0,254	0,102/0,102	0,45/0,45
3	$Q_{ср.пр.}^*$	-0,0338/-0,0519	-0,074/-0,109	-0,0098/-0,0098
4	M_{np}	0,252/0,266	0/0	0,034/0,034
5	γ	0,029/0,048	0,195/0,195	0,159/0,159
6	f_{np}	0,35/0,35		0,35/0,35

Примечание: в числителе параметры прокатки при коэффициенте трения в очаге деформации неприводной клетки $f_H = 0,25$; в знаменателе – при $f_H = 0,4$.

Следующий этап работы включал исследование влияния коэффициента трения в очагах деформации приводных клетей на устойчивость процесса и суммарный момент $\sum M^*$ при прокатке со средней неприводной клетью. Результаты расчетов показаны в табл.4. Как видно, с увеличением f_{np} суммарный момент $\sum M^*$ возрастает, так при $f_{np} = 0,3$ он равен 0,28, а при $f_{np} = 0,4$ этот момент $\sum M^* = 0,32$, т.е. на 12,5% больше. С увеличением f_{np} продольная устойчивость процесса в первой клетке также увеличивается, а в третьей клетке несколько снижается. Заметим, что изменение натяжения между клетями представленного комплекса не влияет на нейтральный угол γ в неприводной клетке.

Таблица 4 – Влияние коэффициента трения в очагах деформации приводных клетей на продольную устойчивость и суммарный момент

Параметры	$f_{np} = 0,3$			$f_{np} = 0,35$			$f_{np} = 0,4$		
	Клетки			Клетки			Клетки		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
q_0	0	-0,294	0,06	0	-0,239	0,11	0	-0,25	0,1
q_1	-0,294	0,06	0,4	-0,239	0,11	0,4	-0,25	0,1	0,4
$Q_{ср.пр.}^*$	-0,147	-0,102	-0,094	-0,0339	-0,0819	-0,0008	-0,0517	-0,0858	-0,0079
M^*	0,242	0	0,038	0,249	0	0,056	0,266	0	0,054

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ	0	0,195	0,151	0,046	0,195	0,141	0,048	0,195	0,14
f_n		0,3			0,3			0,3	
$\sum M^*$	0,28			0,305			0,32		

Выводы. Таким образом, теоретический анализ показал, что при прокатке в комплексе со средней неприводной клетью суммарный момент несколько меньше по сравнению с обычной прокаткой в трех клетях с натяжением полосы. Изменение коэффициента трения как в приводных клетях, так в контакте холостых валков с полосой влияет на суммарный момент деформации и на продольную устойчивость металла в валках каждой клетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лохматов А.П. Непрерывная прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей / А.П.Лохматов, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков. – К.: Наукова думка. – 1998. – 106с.
2. Жучков С.М. Энергосбережение при непрерывной сортовой прокатке с неприводными рабочими клетями / С.М.Жучков, Л.В.Кулаков, А.П.Лохматов, Э.С.Сивак // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – № 8-9. – С.179-182.
3. Лохматов А.П. Методика определения сопротивления, создаваемого неприводной клетью, при непрерывной прокатке сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей / А.П.Лохматов, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1995. – №6 – С.14-16.
4. Максименко О.П. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко, М.К.Измайлова. – Днепро-дзержинск: ДГТУ, 2016. – 213с.
5. Пат. 89747 Україна, МПК В21В 1/22(2006.01). Спосіб прокатування плоских виробів / О.П.Максименко, В.М.Самохвал, М.Є.Нехаєв, Д.І.Лобойко; заявник та патентовласник Дніпродзерж. держ. техн. унів-т. – № u201314742; заявл. 16.12.13; опубл. 25.04.14, Бюл. №8.
6. 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 // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – №4 – С.73-76.

Поступила в редколлегию 18.12.2017.