

3. С помощью полученных решений проанализированы процессы обработки металлов давлением, показано влияние граничных условий задачи на силовые параметры пластического формоизменения.

4. Предложенные аналитические решения и обобщенные граничные условия могут использоваться в прикладных задачах с симметричным и асимметричным нагружениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безухов Н.И. Основы теории упругости пластичности и ползучести / Безухов Н.И. – М.: Высшая школа, 1968. – 512с.
2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Малинин Н.Н. – М.: Машиностроение, 1975. – 399с.
3. Производство высокоэффективного металлопроката / [Чигиринский В.В., Мазур В.Л., Бергеман Г.В. и др.]. – Днепропетровск: РВА "Дніпро - Вал", 2006. – 261с.
4. Чигиринский В.В. Метод решения задач теории пластичности с использованием гармонических функций / Чигиринский В.В. // Изв вузов. Черная металлургия. – 2009. – №5. – С.11-16.
5. Чигиринский В.В. Аналитическое исследование модели пластической среды / Чигиринский В.В. // Изв вузов. Черная металлургия. – 2012. – №1. – С.55-57.
6. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел / Надаи А. – М.: Издательство иностранной литературы, 1954. – 647с.
7. Василев Я.Д. Теория продольной прокатки / Василев Я.Д., Минаев А.А. – Донецк: УНИТЕХ, 2009. – 488с.
8. Чигиринский В.В. Определение напряженного состояния пластического тела в условиях плоской деформации / Чигиринский В.В. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. – №7. – С.48-49.
9. Производство тонкостенного проката специального назначения / [Чигиринский В.В., Кресанов Ю.С., Качан А.Я. и др.]. – Запорожье: "ВАЛПИС", 2014. – 295с.
10. Клименко П.Л. Контактные напряжения при прокатке / Клименко П.Л., Данченко В.Н. – Днепропетровск: ПОРОГИ, 2007. – 285с.
11. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / Сторожев М.В., Попов Е.А. – М.: Машиностроение, 1977. – 422с.

Поступила в редколлегию 27.03.2018.

УДК.621.771.01

DOI 10.31319/2519-2884.32.2018.164

МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., профессор
ЛОБОЙКО Д.И., ассистент
ГОРБАТЕНКО Ю.А., магистр

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

ВЛИЯНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОСЫ НА СУММАРНЫЙ МОМЕНТ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ

Введение. Разработка энергосберегающей технологии прокатки на непрерывных станах представляется важной теоретической и практической задачей, одним из эффективных путей решения которой является оптимизация режимов натяжения полосы в межклетевых промежутках. Методика расчета оптимальных с точки зрения энергосбережения режимов натяжения пока не в полной мере разработана, хотя отдельные публикации по данному вопросу в технической литературе имеются. Так, в работе [1] при определении рационального режима натяжения полосы при холодной прокатке исхо-

дили из критерия, представляющего собой отношение суммарных мощностей на бочках валков при деформации с натяжением и без него. Однако с помощью этого критерия без учёта дополнительных условий трудно определить оптимальный режим натяжения.

Постановка задачи. Целью работы является построение энергосберегающей технологии непрерывной прокатки за счёт рационализации режима натяжения и обжатия.

Результаты работы. Как следует из основного уравнения непрерывной прокатки [2], все составляющие суммарного баланса работ при неизменных граничных условиях зависят от характера распределения удельных сил трения в очагах деформации всех клетей стана. В свою очередь силы трения в зонах отставания и опережения во многом определяются режимом натяжения металла. Поэтому в соответствии с изложенным выше целесообразно установить насколько эффективно влияние условий трения и натяжения полосы на снижение энергозатрат на бочке валков каждой из клетей и в целом по непрерывному стану. Кроме того, определенный интерес в отношении изучаемых зависимостей связан с тем, что потеря равновесия сил в очаге деформации с последующей частичной или полной пробуксовкой металла в валках может возникать при наличии зоны опережения [3, 4]. В связи с этим в каждом случае прокатки следует давать оценку продольной устойчивости полосы в валках [5-7].

Методика проведения исследования включает численное решение уравнения Т. Кармана с учётом натяжения полосы при разных моделях трения на контакте. Среди них применили закон трения скольжения ($t_x = fp_x$), закон пластического трения ($t_x = f_3 2k_{cp}$) и двухзвенную модель плавного изменения удельных сил трения в очаге деформации, описанную в работе [8]. При решении задачи определили распределение контактных напряжений, используя методику [5, 6], рассчитали текущее в очаге деформации значение продольных сил $Q_{хпр}$ и среднеинтегральное $Q_{ср.пр}$ их значение. Кроме того, нашли силы трения в зонах отставания $T_{от}$ и опережения $T_{оп}$, момент на бочке валков $M_{б}$ и его суммарное значение в целом по стану $\sum M_{б}$.

В качестве примера рассмотрим случай прокатки листа на непрерывном четырехклетевом стане в валках диаметром $D = 200$ мм. Режим обжатий приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Режим обжатия на четырехклетевом стане

Номер клетки	Толщина полосы, мм		Абсолютное обжатие Δh , мм	Угол захвата α , рад
	h_0	h_1		
1	3,0	2,0	1,0	0,1
2	2,0	1,4	0,6	0,0771
3	1,4	0,9	0,5	0,0707
4	0,9	0,6	0,3	0,0548

Согласно [2] момент на бочке валков (рис. 1) определяли по формуле

$$M_{б} = 2k_{cp} R b_{cp} \left(\int_{\gamma}^{\alpha} \frac{t_x}{2k_{cp}} d\varphi - \int_0^{\gamma} \frac{t_x}{2k_{cp}} d\varphi \right) \quad (1)$$

или в безразмерной форме

$$M_{б}^* = \frac{M_{б}}{2k_{cp} R b_{cp}}$$

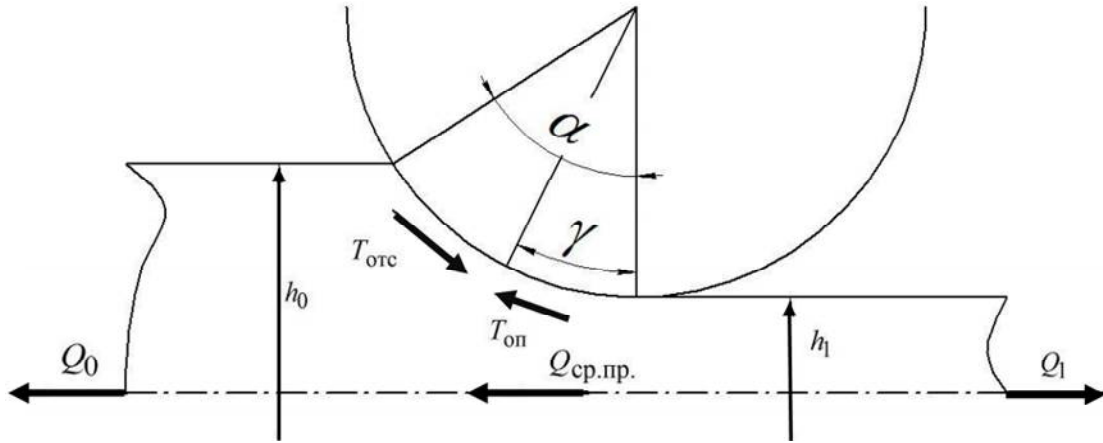


Рисунок 1 – К определению момента на бочке вала

Заметим, что выражение в скобках формулы (1) представляет собой разность безразмерных сил трения в зонах отставания $T_{от}^*$ и опережения $T_{оп}^*$. Текущее значение продольной силы пластически деформируемого металла рассчитывали по выражению

$$Q_{x пр.} = (p_x - 2k_{ср})(h_1 + R\varphi^2) b_{ср}$$

или в безразмерном виде

$$Q_{x пр.}^* = \frac{Q_{x пр.}}{2k_{ср} R b_{ср}} \left(\frac{p_x}{2k_{ср}} - 1 \right) \left(\frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right).$$

Среднее интегральное значение этих сил

$$Q_{ср. пр.} = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} Q_{x пр.} d\varphi;$$

$$Q_{ср. пр.}^* = \frac{Q_{ср. пр.}}{2k_{ср} R b_{ср}},$$

где t_x и p_x – удельные силы трения и нормальное давление в очаге деформации; $2k_{ср}$ – среднее сопротивление деформации; α и φ – угол захвата и его текущее значение; γ – угол нейтрального сечения; h_0 и h_1 – толщина полосы до прохода и после него; $b_{ср}$ – средняя в очаге деформации ширина полосы; Q_0 и Q_1 – силы заднего и переднего натяжения полосы; σ_0 и σ_1 – удельное заднее и переднее натяжения; $q_0 = \frac{\sigma_0}{2k_{ср}}$ и $q_1 = \frac{\sigma_1}{2k_{ср}}$ – удельные натяжения в безразмерном виде.

Результаты исследования влияния натяжения полосы на суммарный момент M_6^* при модели трения скольжения приведены в табл.2. Анализ полученных данных показывает, что с увеличением натяжения металла суммарный момент на бочке валков уменьшается. При граничных значениях натяжения это уменьшение составляет:

$$\delta = \frac{0,01768 - 0,01472}{0,01768} \cdot 100\% = 16,7\%.$$

Таблица 2 – Влияние режима натяжения на энергосиловые параметры при прокатке с моделью трения в виде $t_x = fp_x$ ($f = 0,2$)

Номер клетки	q_{0_i}	q_{1_i}	$Q_{\text{ср.пр.}}^*$	γ	$T_{\text{от}}^*$	$T_{\text{оп}}^*$	$M_{\text{б}}^*$	$\sum M_{\text{б}}^*$
1	0	0,1	-0,0088	0,039	0,01678	0,01098	0,00580	0,01768
2	0,1	0,1	-0,0061	0,03	0,01288	0,00861	0,00427	
3	0,1	0,1	-0,0071	0,028	0,01418	0,00993	0,00425	
4	0,1	0	-0,0073	0,022	0,01318	0,00982	0,00326	
1	0	0,2	-0,0078	0,042	0,01558	0,01092	0,00466	0,01625
2	0,2	0,2	-0,0036	0,029	0,01146	0,00739	0,00407	
3	0,2	0,2	-0,0050	0,027	0,01256	0,00855	0,00401	
4	0,2	0	-0,0061	0,021	0,01235	0,00884	0,00351	
1	0	0,3	-0,0070	0,046	0,01428	0,01081	0,00347	0,01472
2	0,3	0,3	-0,0013	0,028	0,01004	0,00617	0,00387	
3	0,3	0,3	-0,0030	0,026	0,01092	0,00718	0,00374	
4	0,3	0	-0,0048	0,019	0,01144	0,0078	0,00364	

$$\delta_1 = \frac{0,00580 - 0,00347}{0,00580} \cdot 100\% = 40,2\%; \delta_2 = 9,3\%; \delta_3 = 12\%; \delta_4 = -11,6\%.$$

С увеличением натяжения продольная устойчивость полосы в валках несколько снижается. Напомним, что в соответствии с методикой [5, 6], если $Q_{\text{ср.пр.}}^* < 0$, то процесс совершается устойчиво, при $Q_{\text{ср.пр.}}^* = 0$ прокатка ведется в предельных условиях, при $Q_{\text{ср.пр.}}^* > 0$ она невозможна по причине недостатка втягивающих металл в валки сил. Сравнивая моменты на бочках валков непрерывного стана при граничных натяжениях ($q = 0,1$ и $q = 0,3$), отметим, что доля первой клетки в общем снижении $\sum M_{\text{б}}^*$ наиболее существенна.

В последней клетки при заднем натяжении $q_{0_4} = 0,3$ момент на бочке валков возрастает по сравнению со случаем, когда $q_{0_4} = 0,1$, и потому относительное снижение момента на бочке валков δ_4 является отрицательной величиной.

Анализируя результаты расчетов, приведенных в табл.3 и 4, приходим к выводу, что качественно выше сформулированные закономерности имеют место и при других моделях трения на контакте. Количественно влияние натяжения полосы на суммарный момент $M_{\text{б}}^*$ при трении, подчиняющемся закону Зибеля (табл.3), является минимальным. В этих условиях момент $\sum M_{\text{б}}^*$ во второй и третьей клетях не зависит от натяжения ($\delta_2 = \delta_3 = 0$).

$$\delta = \frac{0,01576 - 0,01422}{0,01576} \cdot 100\% = 9,8\%;$$

$$\delta_1 = \frac{0,00534 - 0,00316}{0,00534} \cdot 100\% = 40,8\%; \delta_2 = 0; \delta_3 = 0; \delta_4 = -23,3\%.$$

Таблица 3 – Влияние режима натяжения на энергосиловые параметры при прокатке с моделью трения в виде $t_x = f_3 2k_{cp} (f_3 = 0,2)$

№ клетки	q_{0_i}	q_{1_i}	$Q_{ср.пр.}^*$	γ	$T_{от}^*$	$T_{оп}^*$	$M_{б}^*$	$\sum M_{б}^*$
1	0	0,1	-0,0033	0,0367	0,01266	0,00734	0,00534	0,01576
2	0,1	0,1	-0,0023	0,0286	0,00970	0,00572	0,00398	
3	0,1	0,1	-0,0023	0,0261	0,00893	0,00522	0,00370	
4	0,1	0	-0,0021	0,0206	0,00685	0,00411	0,00274	
1	0	0,2	-0,00306	0,0394	0,01212	0,00788	0,00424	0,01497
2	0,2	0,2	-0,00158	0,0286	0,00970	0,00572	0,00398	
3	0,2	0,2	-0,00182	0,0261	0,00852	0,00522	0,00370	
4	0,2	0	-0,00184	0,0198	0,00700	0,00396	0,00305	
1	0	0,3	-0,00289	0,0421	0,01158	0,00842	0,00316	0,01422
2	0,3	0,3	-0,00094	0,0286	0,00970	0,00572	0,00398	
3	0,3	0,3	-0,00136	0,0261	0,00892	0,00522	0,00370	
4	0,3	0	-0,00160	0,0190	0,00717	0,03792	0,00338	

Продольная устойчивость полосы в валках при удельных силах трения, подчиняющихся закону Зибеля, существенно ниже по сравнению с данными, представленными в табл.2.

Зависимость суммарного момента $\sum M_{б}^*$ и средней результирующей силы $Q_{ср.пр.}^*$ от натяжения полосы при двухзвенной модели трения (табл.4) примерно такая же, как и при кулоновском законе, но при значительно меньшем коэффициенте трения $f_{ср}$, который определяли:

$$f_{ср} = \frac{\int_0^{\alpha} \frac{t_x}{2k_{ср}} d\varphi + \int_0^{\gamma} \frac{t_x}{2k_{ср}} d\varphi}{\int_0^{\alpha} \frac{p_x}{2k_{ср}} d\varphi}$$

Таблица 4 – Влияние режима натяжения полосы на энергосиловые параметры при прокатке с двухзвенной моделью трения [8]

№ клетки	q_{0_i}	q_{1_i}	$f_{ср}$	$Q_{ср.пр.}^*$	γ	$T_{от}^*$	$T_{оп}^*$	$M_{б}^*$	$\sum M_{б}^*$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0,1	0,142	-0,00692	0,0310	0,01199	0,00671	0,00507	0,01529
2	0,1	0,1	0,149	-0,00505	0,0250	0,00966	0,00565	0,00401	
3	0,1	0,1	0,114	-0,00486	0,0230	0,00879	0,00512	0,00367	
4	0,1	0	0,116	-0,00341	0,0200	0,00732	0,00390	0,00255	

Продовження таблиці 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0,2	0,142	-0,00595	0,0319	0,01100	0,00608	0,00492	0,01514
2	0,2	0,2	0,149	-0,00282	0,0234	0,00876	0,00489	0,00387	
3	0,2	0,2	0,114	-0,00277	0,0206	0,00733	0,00388	0,00345	
4	0,2	0	0,116	-0,00327	0,0159	0,00617	0,00327	0,00290	
1	0	0,3	0,142	-0,00511	0,0329	0,01008	0,00714	0,00294	0,01307
2	0,3	0,3	0,149	0,00041	0,0222	0,00772	0,00401	0,00371	
3	0,3	0,3	0,114	-0,00300	0,0192	0,00698	0,00373	0,00325	
4	0,3	0	0,116	-0,00288	0,0150	0,00605	0,00288	0,00317	

$$\delta = \frac{0,01529 - 0,01307}{0,01529} \cdot 100\% = 14,5\% ;$$

$$\delta_1 = \frac{0,00507 - 0,00294}{0,00507} \cdot 100\% = 42\%; \delta_2 = 7,5\%; \delta_3 = 11,4\%; \delta_4 = -24,3\% .$$

Следует заметить, что в расчетах значение $f_{\text{ср}}$ в очаге деформации каждой клетки удерживали на постоянном уровне. При таком условии можно оценить влияние натяжения на снижение момента в данной клетке и $\sum M_{\sigma}^*$ в чистовом виде.

Анализируя изменение $Q_{\text{ср.пр}}^*$ в очагах деформации всех клеток непрерывного стана при модели трения [8], необходимо отметить, что при прокатке во второй клетки с удельным натяжением $q_{0_2} = q_{1_2} = 0,3$ значение средней результирующей силы равно 0,00041.

При таком значении $Q_{\text{ср.пр}}^*$ процесс прокатки во второй клетки совершается в условиях, близких к предельным. Приведем эпюры контактных напряжений и текущих продольных сил для этого случая прокатки (рис.2). Как видно, нормальное давление на границах очага деформации и ближе к средней части его меньше $2k_{\text{ср}}$.

В соответствии с этим текущие силы пластически деформируемого металла $Q_{\text{хпр}}^*$ на одной части очага деформации направлены согласно с движением полосы, на другой – в противоположную сторону. Причем площади положительных и отрицательных значений этих сил достаточно близки, что и указывает на условия деформации, близкие к предельным.

Как известно, режим обжатия металла в значительной мере определяет распределение удельных сил трения в очаге деформации, что должно отразиться и на суммарном моменте на бочках валков непрерывного стана. Перераспределим обжатия по клеткам стана таким образом, чтобы они были увеличены во второй и четвертой клетках по сравнению с приведенными в табл.1, и определим изменение моментов M_{σ}^* и $\sum M_{\sigma}^*$ для случая прокатки с кулоновской моделью трения ($f = 0,2$) и при ранее принятых натяжениях полосы. Новый режим обжатий и результаты расчетов приведены в табл.5.

Из анализа данных табл.2 и 5 следует, что на зависимость момента $\sum M_{\sigma}^*$ от натяжения полосы определенное влияние оказывает и режим обжатий по клеткам непре-

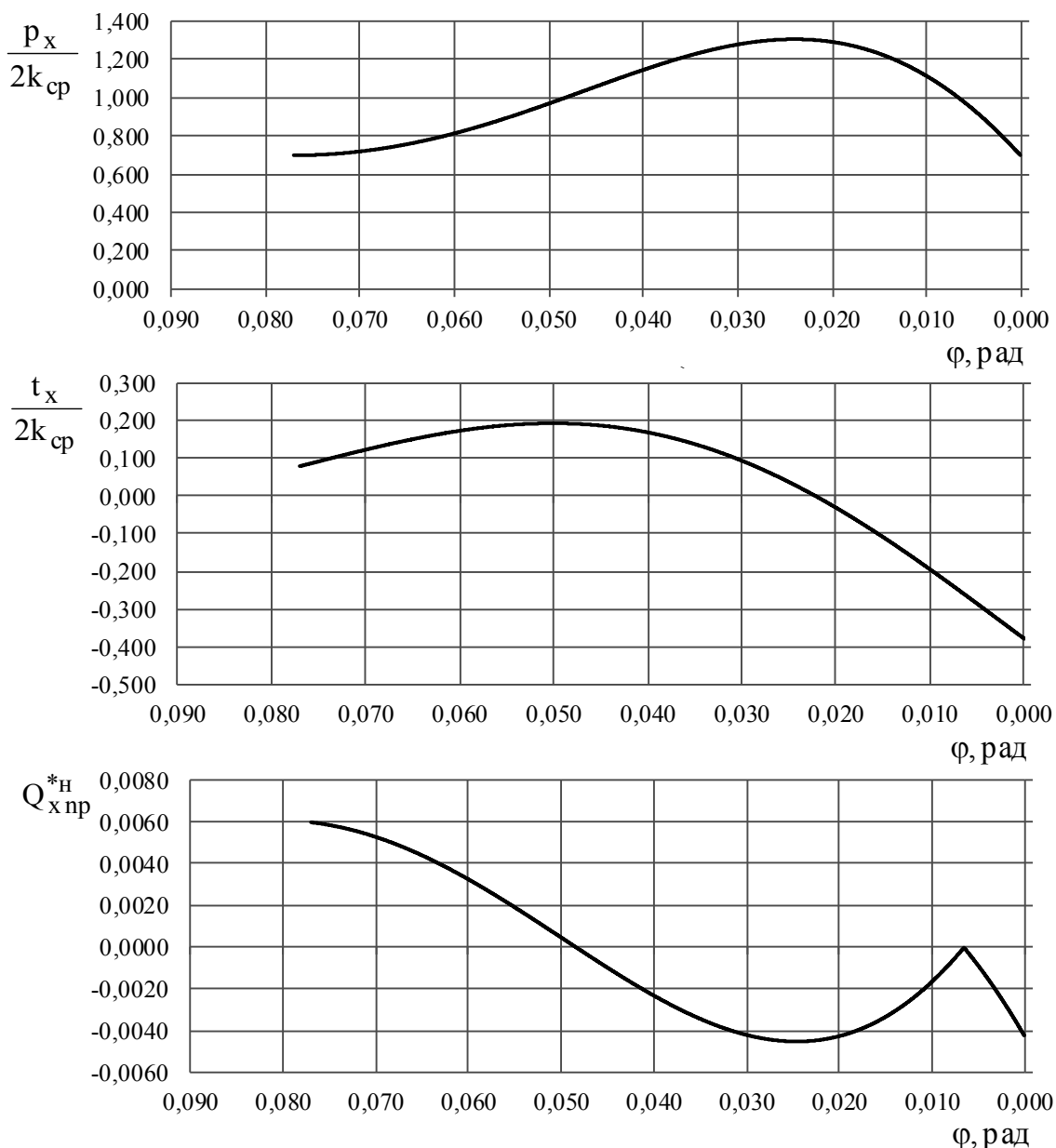


Рисунок 2 – Контактные напряжения и текущие продольные силы при прокатке во второй клетки с $q_{0_2} = q_{1_2} = 0,3$

рывного стана. Так, относительное снижение суммарного момента при первом режиме обжатий составляет $\delta = 16,7\%$, а при обжатиях, представленных в табл.5, $\delta = 22\%$. Из этой же таблицы следует, что при натяжении в первой клетки, равном $q_{0_1} = 0$ и $q_{1_1} = 0,3$, момент M_6^* становится отрицательным, т.е. полоса за счет силы переднего натяжения как бы передает валкам некоторое количество энергии.

$$\delta = \frac{0,01769 - 0,01384}{0,01769} \cdot 100\% = 22\%;$$

$$\delta_1 = \frac{0,00181 + 0,00089}{0,00181} \cdot 100\% = 149\%; \delta_2 = 11\%; \delta_3 = 11,4\%; \delta_4 = -2,4\%.$$

Таблица 5 – Влияние натяжения полосы на энергосиловые параметры в условиях перераспределений обжатий при трении скольжения ($f = 0,2$)

№ клетки	h_0 , мм	h_1 , мм	α , рад	q_0	q_{1i}	$Q_{ср.пр.}^*$	γ	$T_{от}^*$	$T_{оп}^*$	$M_б^*$	$\sum M_б^*$
1	3	2,5	0,0707	0	0,1	-0,0059	0,032	0,00948	0,00767	0,00181	0,01769
2	2,5	1,5	0,1	0,1	0,1	-0,0074	0,035	0,01799	0,01075	0,00724	
3	1,5	1,0	0,0707	0,1	0,1	-0,0067	0,028	0,01334	0,0093	0,00404	
4	1,0	0,6	0,0632	0,1	0	-0,0087	0,024	0,01669	0,01209	0,00460	
1	3	2,5	0,0707	0	0,2	-0,0050	0,036	0,00836	0,00789	0,00047	0,01576
2	2,5	1,5	0,1	0,2	0,2	-0,0042	0,034	0,01592	0,00908	0,00684	
3	1,5	1,0	0,0707	0,2	0,2	-0,0045	0,027	0,01183	0,00802	0,00381	
4	1,0	0,6	0,0632	0,2	0	-0,0087	0,023	0,01554	0,01086	0,00468	
1	3	2,5	0,0707	0	0,3	-0,0046	0,04	0,00716	0,0085	-0,00089	0,01384
2	2,5	1,5	0,1	0,3	0,3	0,0012	0,033	0,01383	0,00739	0,00644	
3	1,5	1,0	0,0707	0,3	0,3	-0,0025	0,027	0,01031	0,00673	0,00358	
4	1,0	0,6	0,0632	0,3	0	-0,0057	0,021	0,01426	0,00955	0,00471	

Выводы. С увеличением натяжения полосы суммарный момент на бочках валков непрерывного стана уменьшается. Доля первой клетки в общем снижении момента является наиболее существенной. При этом снижается и продольная устойчивость металла в очагах деформации. При значительном натяжении в отдельных клетях процесс может совершаться в условиях, близких к предельным. Такие зависимости имеют место при разных моделях трения на контакте металла с валками. Перераспределение обжатий по клетям в условиях непрерывной прокатки с натяжением полосы также влияет на суммарный момент на бочках валков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василев Я.Д. Разработка энергосберегающих режимов натяжений на непрерывных станах холодной прокатки / Я.Д.Василев, Д.Н.Самокиш // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2003. – №2. – С.34-38.
2. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов / В.Н.Выдрин. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 255с.
3. Грудев А.П. Захватывающая способность прокатных валков / А.П.Грудев. – М.: СП Интермет Инжиниринг, 1998. – 283с.
4. 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.: Metallurgiya. – 1967. – Выпуск ЛП. – С.79-88.
5. 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*. – 2014. – №6. – С.47-49.
6. Максименко О.П. Продольная устойчивость в валках с анализом контактных условий: монография / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко, М.К.Измайлова. – Днепропетровск: ДДТУ, 2016. – 212с.
7. Максименко О.П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко, Р.Я.Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №6. – С.47-49.
8. 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 21.05.2018.