

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 $\Delta h$ , мм	Угол захвата $\alpha$ , 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

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

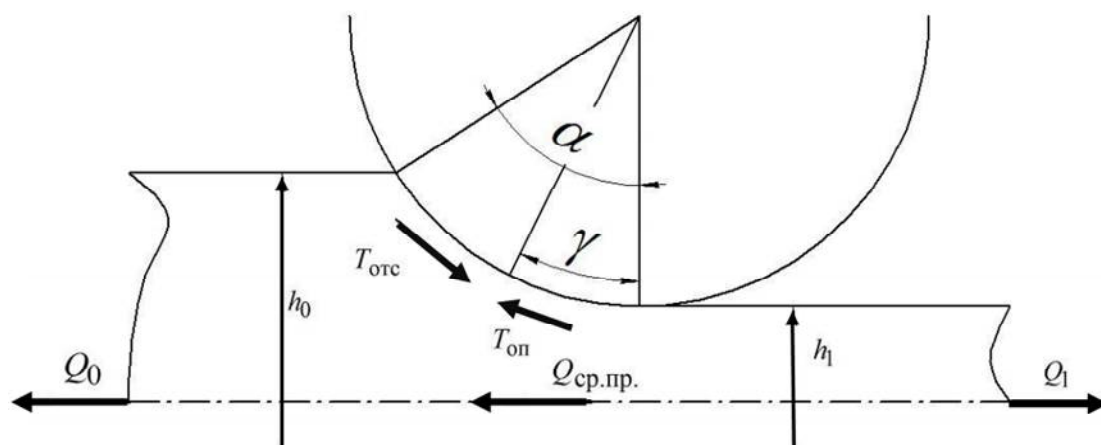


Рисунок 1 – К определению момента на бочке вала

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;  $\alpha$  и  $\varphi$  – угол захвата и его текущее значение;  $\gamma$  – 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;  $\sigma_0$  и  $\sigma_1$  – 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	$q_{0_i}$	$q_{1_i}$	$Q_{ср.пр.}^*$	$\gamma$	$T_{от}^*$	$T_{оп}^*$	$M_{б}^*$	$\sum M_{б}^*$
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  $Q_{ср.пр.}^* < 0$ , то процесс совершается устойчиво, при  $Q_{ср.пр.}^* = 0$  прокатка ведется в предельных условиях, при  $Q_{ср.пр.}^* > 0$  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  $\sum M_{б}^*$  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  $\delta_4$  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  $M_{б}^*$  при трении, подчиняющемся закону Зибеля (табл.3), является минимальным. В этих условиях момент  $\sum M_{б}^*$  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	$q_{0_i}$	$q_{1_i}$	$Q_{ср.пр.}^*$	$\gamma$	$T_{от}^*$	$T_{оп}^*$	$M_{б}^*$	$\sum M_{б}^*$
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	$q_{0_i}$	$q_{1_i}$	$f_{ср}$	$Q_{ср.пр.}^*$	$\gamma$	$T_{от}^*$	$T_{оп}^*$	$M_{б}^*$	$\sum M_{б}^*$
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  $M_{\sigma}^*$  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-

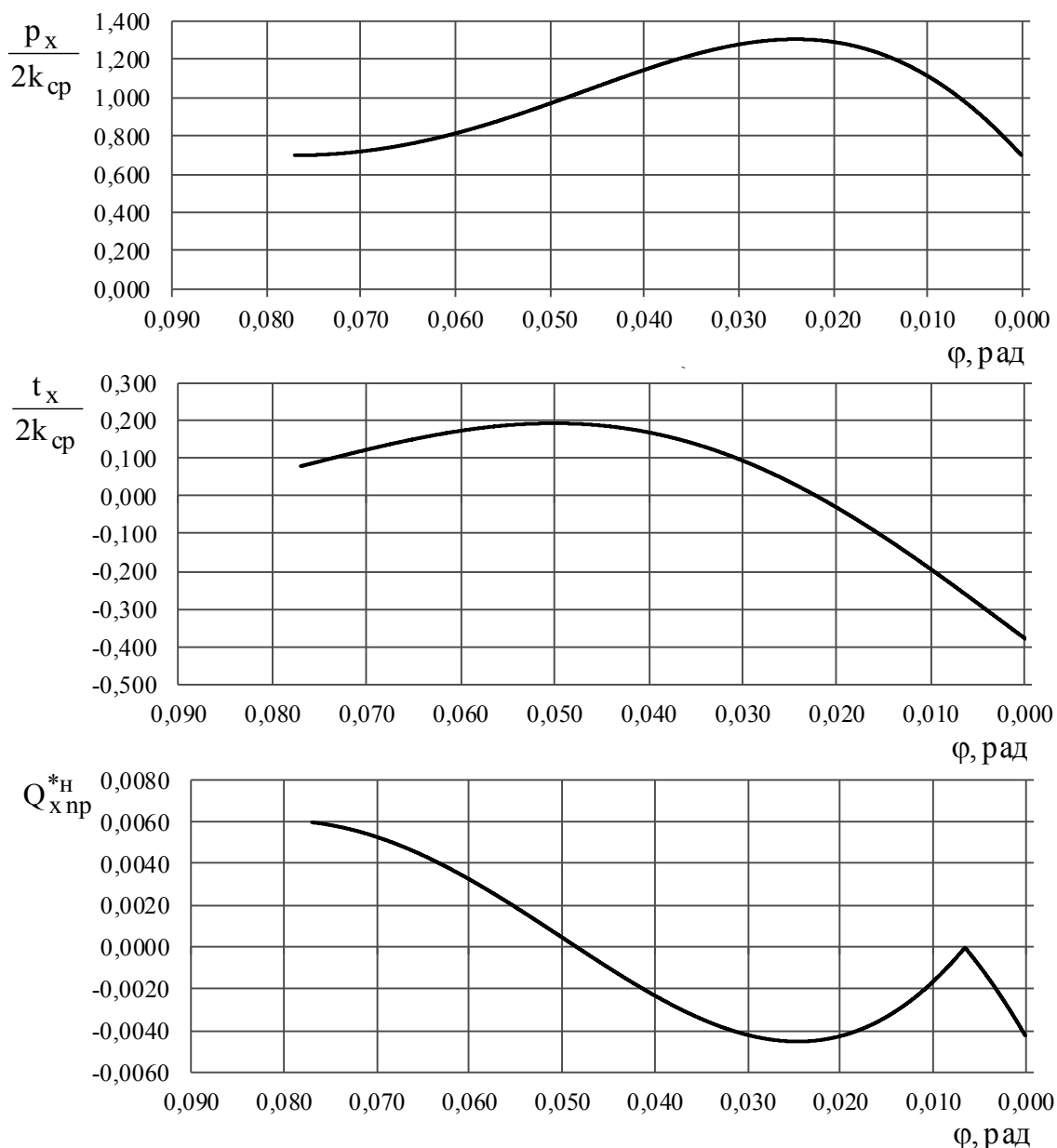


Рисунок 2 – Контактные напряжения и текущие продольные силы при прокатке во второй клетки с  $q_{0_2} = q_{1_2} = 0,3$

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	$\alpha$ , рад	$q_0$	$q_{1i}$	$Q_{\text{ср.пр.}}^*$	$\gamma$	$T_{\text{от}}^*$	$T_{\text{оп}}^*$	$M_{\text{б}}^*$	$\sum M_{\text{б}}^*$
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.