

УДК 621.771.01

Максименко О. П.
Романюк Р. Я.
Белоус Е. В.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА НАТЯЖЕНИЙ НА СТАНЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ 1680 КОМБИНАТА «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»

В работах [1–3] разработан новый теоретический метод оценки продольной устойчивости процесса прокатки. Его суть заключается в том, что контактные вытягивающие силы затрачиваются не только на преодоление контактных выталкивающих, но и на уравнивание продольных сил, которые вызваны пластической деформацией металла. В результате чего предельные условия деформации наступают раньше, чем угол нейтрального сечения, а, следовательно, и опережение принимают нулевые значения, что экспериментально подтверждено в [4–6].

Этот метод позволяет достоверно с точностью до 10 % прогнозировать наступления предельных условий деформации при листовой прокатке. На основе данного метода в работе [7] приведены рекомендации по оптимальным режимам натяжений для непрерывных станов холодной прокатки жести комбината «Запорожсталь».

Целью данной работы является теоретический анализ влияния натяжений на устойчивость и общие энергозатраты в чистовой группе клетей стана горячей прокатки 1680 комбината «Запорожсталь».

Для проведения теоретических исследований воспользуемся данными о существующем режиме деформации на данном стане при прокатке листа 3×1400 мм из стали 3кп [8], приведенные в табл. 1. Основные параметры процесса прокатки (f_y , t , $l_{снл}$, σ_T и др.) рассчитывали по известным зависимостям [9, 10].

Таблица 1

Режим обжатий, силовые и кинематические параметры процесса прокатки листа 3×1400 мм в чистовой группе клетей стана 1680

№ клетки	h_l , мм	ε , %	α_y , рад	V_e , м/с	Опытная сила прокатки, $P_{он}$, МН	$P_{ср}$, МПа	f_y	t , °С	$l_{снл}$, мм
5	13,62	49,8	0,209	1,89	12,33	140	0,298	1012	63,88
6	8,33	38,8	0,131	3,08	10,75	142	0,234	1000	40,17
7	5,61	32,6	0,0944	4,6	12,57	302	0,185	996	30,5
8	4,28	23,3	0,066	6,03	10,67	344	0,171	970	22,1
9	3,37	21,3	0,055	7,66	9,53	369	0,173	925	18,8
10	3	11	0,035	8,6	4,55	271	0,18	900	12,3

Для удобства анализа все расчеты будут представлены в безразмерном виде. Натяжения по клетям относим к пределу текучести металла, т. е.:

$$q_{0i} = \frac{\sigma_{0i}}{\beta \sigma_{T_{i-1}}},$$

$$q_{1i} = \frac{\sigma_{1i}}{\beta \sigma_{T_i}}. \quad (1)$$

Исследования проводили для минимальных, максимальных и средних безразмерных натяжений, которые были выбраны из рекомендуемых значений [8]. Их величины приведены в табл. 2. Натяжения на моталке во всех трех случаях оставались без изменения.

Таблица 2

Значения безразмерных натяжений при прокатке листа 3×1400 мм
в чистовой группе клетей стана 1680

№ клетки	q_0		q_1		q_{0cp}	q_{1cp}
	min	max	min	max		
5	–	–	0,039	0,53	–	0,2845
6	0,039	0,53	0,034	0,363	0,2845	0,1985
7	0,034	0,363	0,03	0,256	0,1985	0,143
8	0,03	0,256	0,015	0,44	0,143	0,2275
9	0,015	0,44	0,015	0,246	0,2275	0,13
10	0,015	0,246	0,01	0,01	0,13	0,01
Σ	0,133	1,835	0,143	1,845	0,9835	0,9935

Для оценки устойчивости процесса прокатки по клетям стана будем использовать новый метод оценки устойчивости процесса прокатки, о котором упоминалось выше. Для этого теоретически рассчитываем распределения контактных напряжений $\frac{p_x}{\beta\sigma_T}$ и $\frac{t_x}{\beta\sigma_T}$, используя дифференциальное уравнение Кармана, горизонтальных напряжений $\frac{q_x}{\beta\sigma_T}$ и текущих

горизонтальных сил Q_x^* в очаге деформации для всех случаев изменения натяжений по вышеприведенному режиму обжатий. В качестве модели трения принимаем кулоновскую зависимость, задачу Кармана решаем методом последовательных приближений Рунге-Кутты.

По эпюрам изменения Q_x^* определяем средние значения сил в безразмерной форме для каждого случая, используя следующую формулу (определение Q_{cp}^* при прокатке с натяжениями приведено в [3]):

$$Q_{cp}^* = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_x^* d\varphi. \quad (2)$$

В размерной форме эту величину можно рассчитать по формуле:

$$Q_{cp} = Q_{cp}^* \beta\sigma_T Rb.$$

Также рассчитываем момент прокатки в каждой клетке, исходя из распределения напряжений трения, по формуле:

$$M_{np} = 2(T_{отс} - T_{он})R$$

или в безразмерной форме:

$$M_{np} = 2(T_{отс} - T_{он}) \frac{R_{спл}}{R_{ном}}, \quad (3)$$

где $(T_{отс} - T_{он})$ – разница площадей напряжений трения в зонах отставания и опережения, определяемые из эпюр;

$R_{ном}$ – сплюснутый радиус вала в каждой клетке;

$R_{ном}$ – номинальный радиус вала в каждой клетке, введен в формулу (3) для получения безразмерного момента.

В табл. 3 приведены результаты расчетов силы $Q_{ср}^*$ и момента $M_{пр}^*$ по клеткам.

Таблица 3

Результаты расчета безразмерных величин сил $Q_{ср}^*$ и моментов $M_{пр}^*$ при прокатке листа 3×1400 мм в чистовой группе клеток стана 1680

№ клетки	Минимальное натяжение		Среднее натяжение		Максимальное натяжение	
	$Q_{ср}^*$	$M_{пр}^*$	$Q_{ср}^*$	$M_{пр}^*$	$Q_{ср}^*$	$M_{пр}^*$
5	0,01256	0,0589	0,01005	0,0454	0,00824	0,0305
6	0,00625	0,0237	0,0002	0,0234	–	0,0225
7	0,00364	0,0123	0,00143	0,0125	–	0,0126
8	0,00253	0,0062	0,00128	0,0044	0,00048	0,0026
9	0,00234	0,0044	0,00103	0,0052	–	0,0059
10	0,00153	0,0017	0,00115	0,0028	0,00071	0,0039
Σ	0,02885	0,1072	0,01514	0,0937		0,078

Как следует из табл. 3, при минимальных натяжениях в очаге деформации во всех клетках чистовой группы стана средняя горизонтальная сила, определяемая по формуле (2), положительная, что свидетельствует об устойчивости процесса прокатки [1–3, 7].

Для примера на рис. 1 приведены эпюры изменения $\frac{P_x}{\beta\sigma_T}$, $\frac{t_x}{\beta\sigma_T}$, $\frac{q_x}{\beta\sigma_T}$ и Q_x^* для 7 клетки стана с минимальными безразмерными натяжениями ($q_0 = 0,034$, $q_1 = 0,03$).

При прокатке со средними удельными натяжениями сила $Q_{ср}^*$ также положительна, но является меньшей по величине, следовательно, процесс является менее устойчивым.

В случае же максимального значения натяжений – в 6, 7 и 9 клетках сила $Q_{ср}^*$ уже отрицательна в результате значительного заднего натяжения, т. е. устойчивая прокатка в данных клетках невозможна.

Проанализируем изменения суммарного момента деформации в зависимости от натяжения полосы. На рис. 2 приведена зависимость суммарной средней результирующей горизонтальной силы и суммарного момента деформации от суммарного натяжения полосы.

Как видно, с увеличением суммы натяжений суммарный момент прокатки снижается. Из этого можно сделать вывод, что энергетически выгодно вести процесс с большими натяжениями, однако, при этом ухудшается и устойчивость процесса прокатки, поскольку уменьшается $Q_{ср}^*$.

Таким образом, отметим, что увеличение межклетьевых натяжений на стане должно быть строго согласовано с продольной устойчивостью процесса прокатки. С этой целью разработаны оптимальные значения передних и задних натяжений по клеткам при прокатке листа 3×1400 мм на стане 1680 комбината «Запорожсталь», при которых обеспечивается минимальный затрачиваемый суммарный момент деформации (учитывая моменты натяжения) и устойчивый процесс. Эти режимы приведены в табл. 4. На рис. 3 этот случай показан квадратными маркерами.

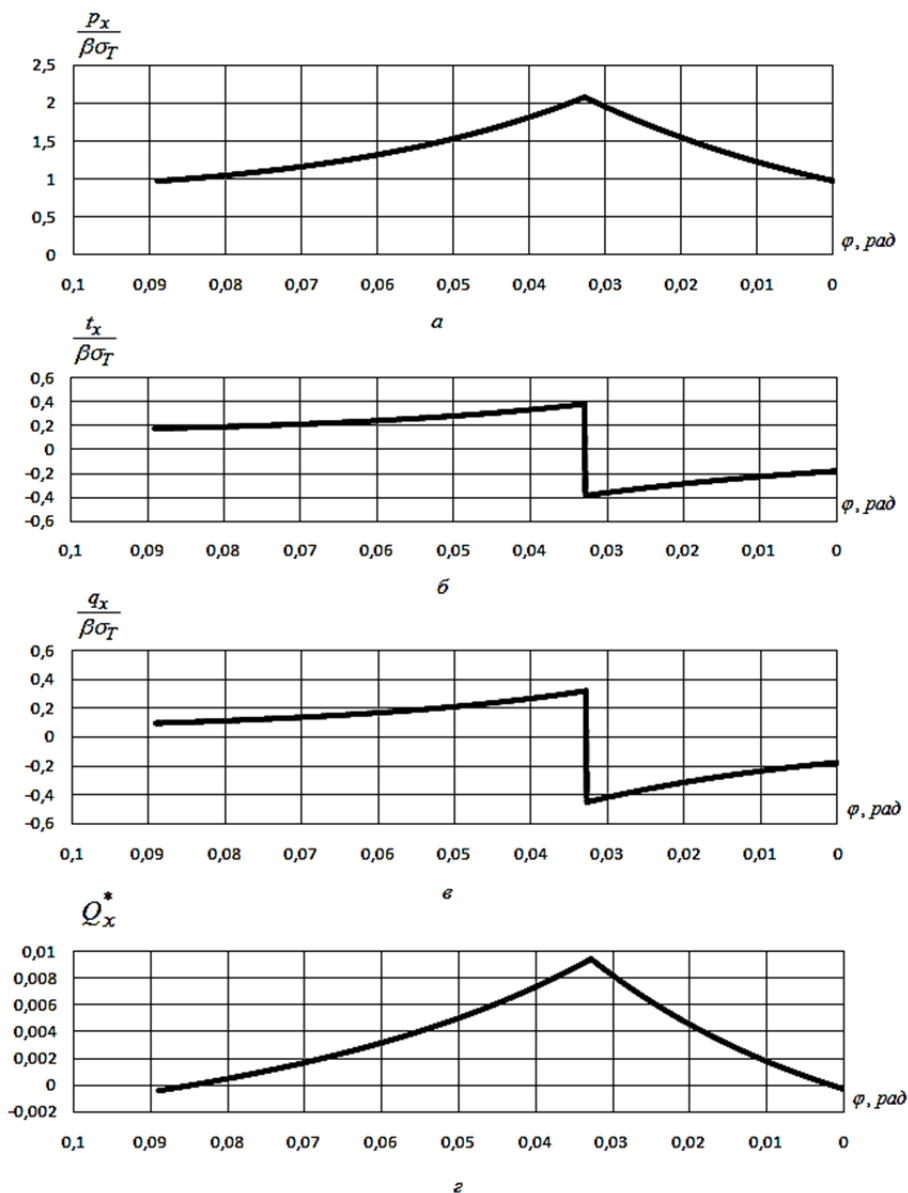


Рис. 1. Теоретические эпюры распределения контактных (а, б), горизонтальных (в) напряжений и текущих контактных сил (г) по длине очага деформации при прокатке листа 3×1400 мм в 7 клетки стана 1680

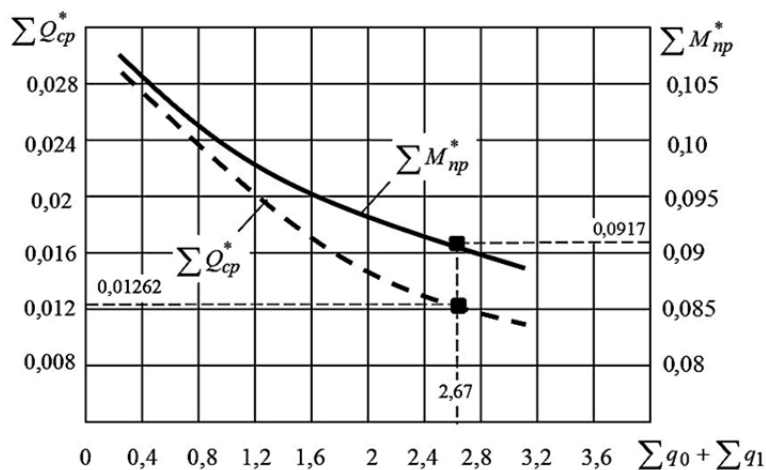


Рис. 2. Зависимость суммарной средней результирующей горизонтальной силы и суммарного момента деформации от суммарного натяжения полосы

Таблица 4

Предлагаемые режимы натяжений для прокатки листа 3×1400 мм на стане 1680 комбината «Запорожсталь»

№ клетки	Предлагаемое безразмерное натяжение		Q_{cp}^*	M_{np}^*
	q_0	q_1		
5	–	0,28	0,01009	0,0457
6	0,28	0,25	0,00018	0,0217
7	0,25	0,25	0,00063	0,0111
8	0,25	0,3	0,00054	0,0047
9	0,3	0,25	0,00049	0,0045
10	0,25	0,01	0,00069	0,004
Σ	1,33	1,34	0,01262	0,0917

ВЫВОДЫ

Проанализирована устойчивость процесса прокатки и изменение суммарного момента деформации в чистовых клетях стана 1680 горячей прокатки комбината «Запорожсталь» при разных натяжениях. Исследования проводились с использованием нового метода оценки устойчивости процесса прокатки, который отличается учетом внутреннего напряженного состояния металла. Показано, что увеличение натяжений снижает энергозатраты на ведение процесса, но при этом ухудшает и устойчивость деформации. Разработаны оптимальные режимы натяжений при прокатке листа 3×1400 мм, которые рекомендуются для производства на стане 1680 комбината «Запорожсталь».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максименко О. П. Исследование средней результирующей горизонтальных сил в очаге деформации при прокатке / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Изв. вуз. Чёрная металлургия*. – 2009. – № 10. – С. 22–24.
2. Максименко О. П. Анализ равновесия сил в очаге деформации при простом процессе прокатки / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – № 59. – С. 161–164. – (Серія «Машинобудування»).
3. Максименко О. П. Оценка устойчивости процесса прокатки жести на стане 1400 КарМК / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4 (25). – С. 173–178.
4. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев. – М. : СП «Интермет Инжиниринг», 1998. – 283 с.
5. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1973. – 288 с.
6. Прокофьев В. И. Максимальные углы захвата при установившемся процессе прокатки / В. И. Прокофьев // *Обработка металлов давлением : научные труды ДМетИ*. – М. : Металлургиздат, 1962. – Вып. XLVIII. – С. 324–329.
7. Максименко О. П. Разработка рациональных режимов натяжений на жестикатальных станах комбината «Запорожсталь» / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Обработка материалов : сб. науч. трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 178–181.
8. Сафьян М. М. Прокатка широкополосной стали / М. М. Сафьян. – М. : Металлургия, 1969. – 460 с.
9. Грудев А. П. Теория прокатки: [учебник для вузов] / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1988. – 240 с.
10. Василев Я. Д. Теорія позовжньої прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк : УНІТЕХ, 2009. – 488 с.

Максименко О. П. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ;

Романюк Р. Я. – ст. преп. ДГТУ;

Белоус Е. В. – магистр ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,
г. Днепродзержинск.

E-mail: r22roma@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.02.2013 г.