

УДК 621.771.01

Максименко О. П.  
Романюк Р. Я.**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ЖЕСТИ НА СТАНЕ 1400 КарМК**

В работах [1–3], на основе анализа средней результирующей горизонтальных контактных сил, которая действует в очаге деформации, разработана методика оценки продольной устойчивости процесса прокатки.

Согласно данной методике, по эпюрам (теоретическим или экспериментальным) контактных напряжений рассчитываются графики изменения результирующего горизонтального напряжения, а также текущей результирующей горизонтальных контактных сил по длине зоны контакта. На основе последнего графика и определяется средняя результирующая горизонтальных контактных сил  $Q_{cp}^*$ . Если эта сила положительна, то процесс прокатки будет протекать устойчиво, если отрицательна – то устойчивый процесс невозможен, и при равенстве  $Q_{cp}^*$  нулю наступают предельные условия деформации.

Таким образом, можно оценить устойчивость процесса при любых параметрах прокатки, а также проверить устойчивость процесса при разработке новых или изменения существующих режимов деформации.

Целью настоящей работы является оценка устойчивости процесса прокатки при производстве жести на стане 1400 Карагандинского металлургического комбината.

Цех жести КарМК [4] предназначен для производства луженой жести, чёрной жести, стальных листов кровельной и конструкционной стали. В сортамент готовой продукции цеха входят белая жесь толщиной 0,15–0,36 мм, в том числе жесь, получаемая методом двойной прокатки и стальные полосы толщиной 0,25–0,6 мм. Прокатку жести ведут на шестиклетьевом стане 1400 бесконечной холодной прокатки. Для производства тонкой жести № 15 используется метод двойной прокатки, суть которого состоит в прокатке на шестиклетьевом стане, а затем, после отжига, на 2-х клетьевом прокатно-дрессировочном стане.

Оценку устойчивости процесса деформации на стане 1400 КарМК будем проводить на примере прокатки жести № 22, производимой на шестиклетьевом стане, поэтому ограничимся рассмотрением характеристик только этого стана. Краткая техническая характеристика стана приведена в табл. 1.

Таблица 1

Техническая характеристика шестиклетьевого стана 1400

Диаметр рабочего вала, мм	570-600
Диаметр опорного вала, мм	1320–1400
Длина бочки валков, мм	1400
Максимальная скорость прокатки, м/с	33
Допустимое значение силы прокатки, МН	20

Существующий режим обжатий и энергосиловые параметры при производстве жести толщиной 0,22 мм [4] приведены в табл. 2 (колонки 1–9).

Анализ устойчивости процесса прокатки в каждой клетке начинается с расчёта эпюр контактных напряжений. Теоретически их можно получить при совместном решении дифференциального уравнения равновесия Т. Кармана и модели трения (рис. 1). Эта модель состоит из трёх участков: 2 участка, где выполняется закон Кулона (кривая 1 и 3) и зона, где осуществляется плавный переход от максимальных значений удельных сил трения к минимальным (кривая 2).

Таблица 2

Существующий режим обжатий и энергосиловые параметры при производстве жести № 22

№ клетки	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\varepsilon$ , %	$q_0$ , МПа	$q_1$ , МПа	$p_{ср}$ , МПа	$P$ , МН	$Q_{ср}$ , кН
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2,4	2,11	0,29	12,1	28	135	609	6,4	54
2	2,11	1,29	0,82	39	135	143	717	9,4	11,4
3	1,29	0,79	0,5	38,8	143	171	781	9,22	-10,3
4	0,79	0,49	0,3	38	171	195	835	8,95	3,7
5	0,49	0,345	0,145	30	195	169	943	8,39	5,6
6	0,345	0,22	0,125	36,2	169	46	1108	9,98	20,2

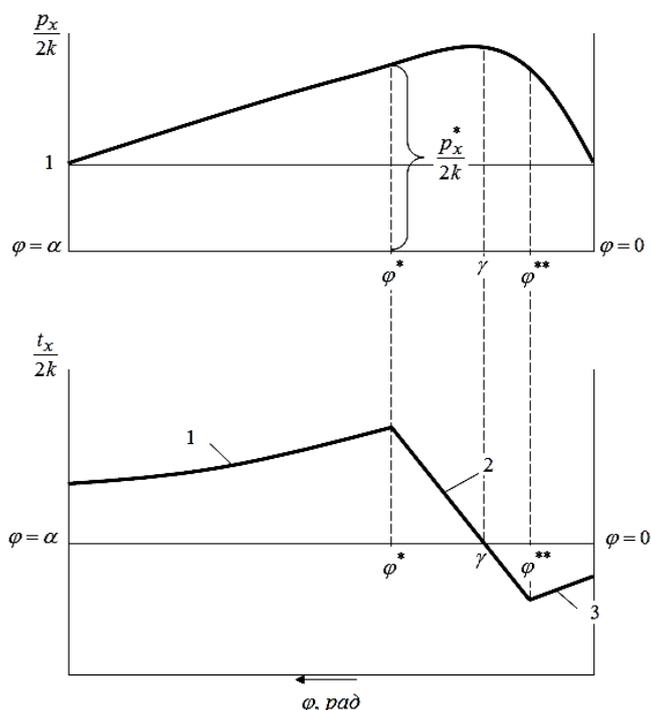


Рис. 1. Модель трения с учетом зоны прилипания

В общем случае данную модель трения можно представить в виде:

$$\frac{t_x}{2k} = \begin{cases} f_y \frac{p_x}{2k}, & \text{при } \alpha > \varphi > \varphi^*; \\ f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}, & \text{при } \varphi^* > \varphi > \varphi^{**}; \\ -f_y \frac{p_x}{2k}, & \text{при } \varphi^{**} > \varphi > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi^*$  – сечение перехода от закона Кулона, который действует в зоне отставания, к модели, которая описывает зону прилипания;

$\frac{p_x^*}{2k}$  – безразмерное давление в сечении  $\varphi^*$ ;

$\gamma$  – угол нейтрального сечения;

$f_y$  – коэффициент трения в зонах скольжения;

$\varphi^{**}$  – сечение перехода от закона Кулона, который действует в зоне опережения, к модели, которая описывает зону прилипания.

Сечение  $\varphi^*$  выбирается при выполнении следующих условий:

– величина удельных сил трения в безразмерном виде не должна превышать 0,5, т. е.:

$$\frac{t_x}{2k} \leq 0,5; \quad (2)$$

– средний коэффициент трения, определенный из эпюр контактных напряжений по формуле:

$$f_{cp} = \frac{\int_0^\alpha \frac{t_x}{2k} d\varphi}{\int_0^\alpha \frac{p_x}{2k} d\varphi} \quad (3)$$

должен быть максимально приближенный к коэффициенту трения скольжения, которое задается при построениях эпюр, т. е.:

$$f_{cp} \rightarrow f_y. \quad (4)$$

После соединения кривых 1 и 2 (рис. 1), переходим к стыковке кривых 2 и 3. Для этого определяем сечение  $\varphi^{**}$ , которое является единственным при выполнении вышеприведенных условий для  $\varphi^*$ .

Проверяем полученную эпюру на выполнение следующего условия:

$$\frac{t_x}{2k} \geq -0,5. \quad (5)$$

Если это условие не выполняется необходимо возвратиться к выбору сечения  $\varphi^*$ . С использованием ЭВМ это делается достаточно легко. Таким образом, получена эпюра распределения удельных сил трения.

Подставив модель (1) в дифференциальное уравнение равновесия, и решив его методом последовательных приближений Рунге-Кутта с граничными условиями:  $\frac{p_x}{2k} = 1 - \frac{q_0}{2k}$  при

$\varphi = \alpha$ , и  $\frac{p_x}{2k} = 1 - \frac{q_1}{2k}$  при  $\varphi = 0$  ( $q_0$  и  $q_1$  – заднее и переднее удельные натяжения), получаем эпюру распределения нормального давления.

Далее из эпюр контактных напряжений, согласно методике [1–3], находим распределения результирующих горизонтальных напряжений и текущей результирующей горизонтальных контактных сил  $Q_x^*$ , а затем рассчитываем силу  $Q_{cp}^*$ .

Расчёт средней результирующей горизонтальных контактных сил  $Q_{cp}^*$  проводим для каждой клетки стана 1400 КарМК при производстве жести № 22. Полученные результаты занесены в табл. 1 (колонка 10).

Расчёты показали, что в третьей клетки сила  $Q_{cp}^* < 0$ , т. е., согласно [1–3], в этом случае устойчивый процесс прокатки невозможен. Эпюры контактных и результирующих горизонтальных напряжений, а также текущей результирующей горизонтальных контактных сил  $Q_x^*$  для этой клетки приведены на рис. 2.

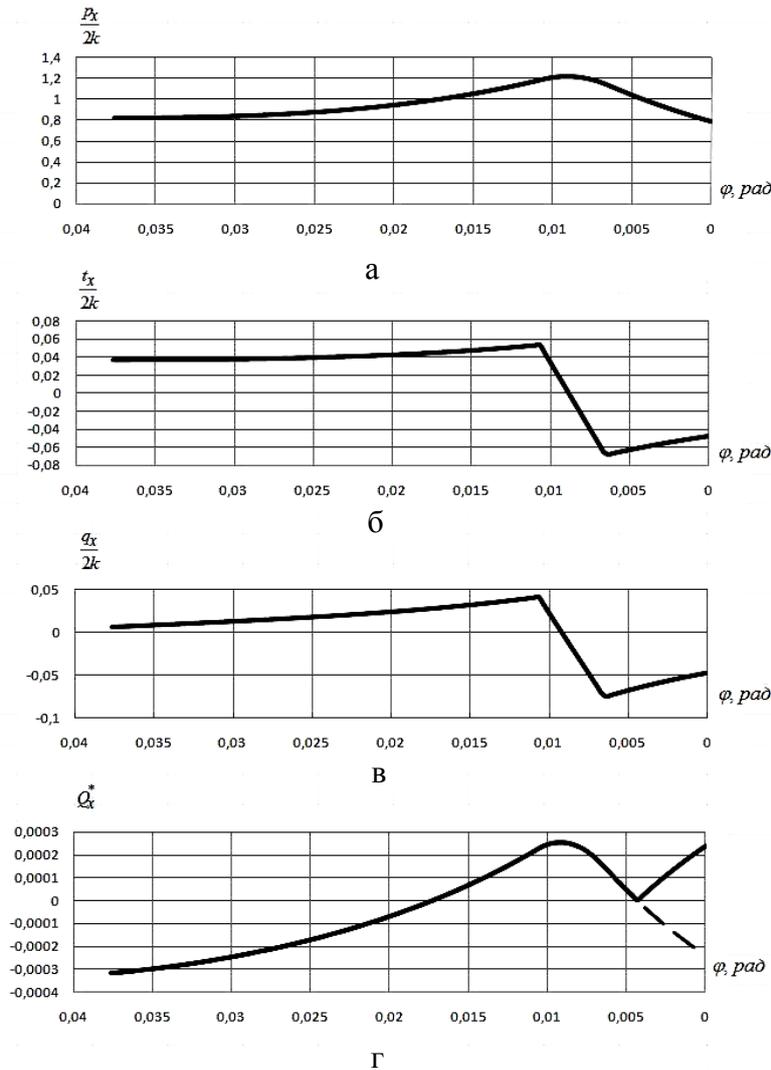


Рис. 2. Эпюры изменения по длине очага деформации контактных (а, б) и горизонтальных напряжений (в), а также силы  $Q_x^*$  (г) по существующему режиму

Как видно из рис. 2, на границах зоны контакта нормальные давления меньше единицы в результате действия растягивающих напряжений (рис. 2, а), а значения  $Q_x^*$  в этих же сечениях (рис. 2, г) соответствуют величинам сил переднего и заднего натяжения.

Стоит также заметить, что в зоне, которая находится вблизи выхода металла из валков, имеется сечение, в котором  $Q_x^* = 0$  (рис. 2, г). В этом случае  $\frac{P_x}{2k} = 1$ , поэтому  $\frac{\sigma_x}{2k} = 0$ ,

$Q_{x\text{вн}}^* = 0$  ( $\frac{\sigma_x}{2k}$  – внутреннее горизонтальное напряжение,  $Q_{x\text{вн}}^*$  – текущая продольная внутренняя сила) и, следовательно,  $2Q_x^* = Q_{x\text{вн}}^* = 0$  [1–3]. Далее по направлению прокатки  $Q_x^*$  становится отрицательной (рис. 2, г, пунктирная линия). Но т. к. в этой области действуют удельные растягивающие напряжения (рис. 2, а), а направление действия их совпадает с направлением прокатки, следовательно, необходимо в этой зоне изменить знак сил  $Q_x^*$  на противоположный (рис. 2, г, сплошная линия). Замена знака силы  $Q_x^*$  в этой области объясняется тем, что горизонтальные проекции напряжений  $\frac{P_x}{2k}$  по всей длине зоны контакта имеют одно и то же направление (против хода прокатки).

Итак, процесс прокатки в третьей клети является неустойчивым ввиду низкой шероховатости поверхности валков, а, следовательно, и низкого коэффициента трения ( $f_y = 0,035 - 0,04$ ), и осуществляется за счёт натяжения 4 клети. В остальных клетях, согласно с расчётами, процесс является устойчивым.

Ведение процесса прокатки в неустойчивом режиме в третьей клети нежелательно, поскольку малейшее изменение коэффициента трения может привести к аварийным ситуациям на стане или отразиться на качестве проката (утяжка, нарушение геометрии и др.).

Поэтому, используя методику [1–3], выполнено изменение существующего режима обжатий с целью получения устойчивого процесса прокатки во всех клетях. При этом удельные натяжения и шероховатости поверхности валков остались без изменения. Предлагаемый режим обжатий и результаты расчёта энергосиловых параметров приведены в табл. 3.

Таблица 3

Предлагаемый режим обжатий и результаты расчёта энергосиловых параметров при производстве жести № 22

№ клети	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\varepsilon$ , %	$p_{cp}$ , МПа	$P$ , МН	$Q_{cp}$ , кН
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2,4	2	0,4	16,7	566	6,5	61,4
2	2	1,2	0,8	40	881,5	14,3	97,1
3	1,2	0,75	0,45	37,5	874	11,4	17,7
4	0,75	0,45	0,3	40	1143,3	13,4	59,4
5	0,45	0,35	0,1	22,2	1026,8	9,3	16,8
6	0,35	0,22	0,13	37,1	1153,7	11,2	22,6

Сравнивая предлагаемый режим деформации с существующим, заметим, что наибольшие изменения произошли в первой клети, в сторону увеличения обжатия, и в пятой – в сторону уменьшения. При этом энергосиловые параметры существенно не изменились и усилия прокатки не превышают допустимых значений. Что касается третьей клети, то здесь предлагается уменьшить обжатия с  $\varepsilon = 38,8\%$  ( $\Delta h = 0,5$  мм) до  $\varepsilon = 37,5\%$  ( $\Delta h = 0,45$  мм) и, в результате этого, средняя результирующая контактная сила будет положительна и способствовать устойчивому ведению процесса прокатки. Эпюры изменения по длине очага деформации контактных и результирующих горизонтальных напряжений, а также силы  $Q_x^*$  в третьей клети по предлагаемому режиму приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, г, положительная область изменения силы  $Q_x^*$  является большей, чем отрицательная, поэтому  $Q_{cp}^* > 0$  и процесс является устойчивым.

Таким образом, можно рекомендовать данный режим обжатий для прокатки жести толщиной 0,22 мм на стане 1400 КарМК. Отличительной особенностью предлагаемого режима, по сравнению с существующим, является устойчивое ведение процесса прокатки во всех клетях стана.

## ВЫВОДЫ

Используя методику оценки продольной устойчивости процесса деформации, проанализирована стабильность процесса прокатки при производстве жести толщиной 0,22 мм на стане 1400 КарМК. Показано, что в третьей клети процесс прокатки является неустойчивым. Ведение процесса деформации обеспечивается за счёт натяжения 4 клети. Для обеспечения стабильности процесса прокатки на стане предложены режимы обжатий, при которых будет осуществляться устойчивый процесс деформации во всех клетях.

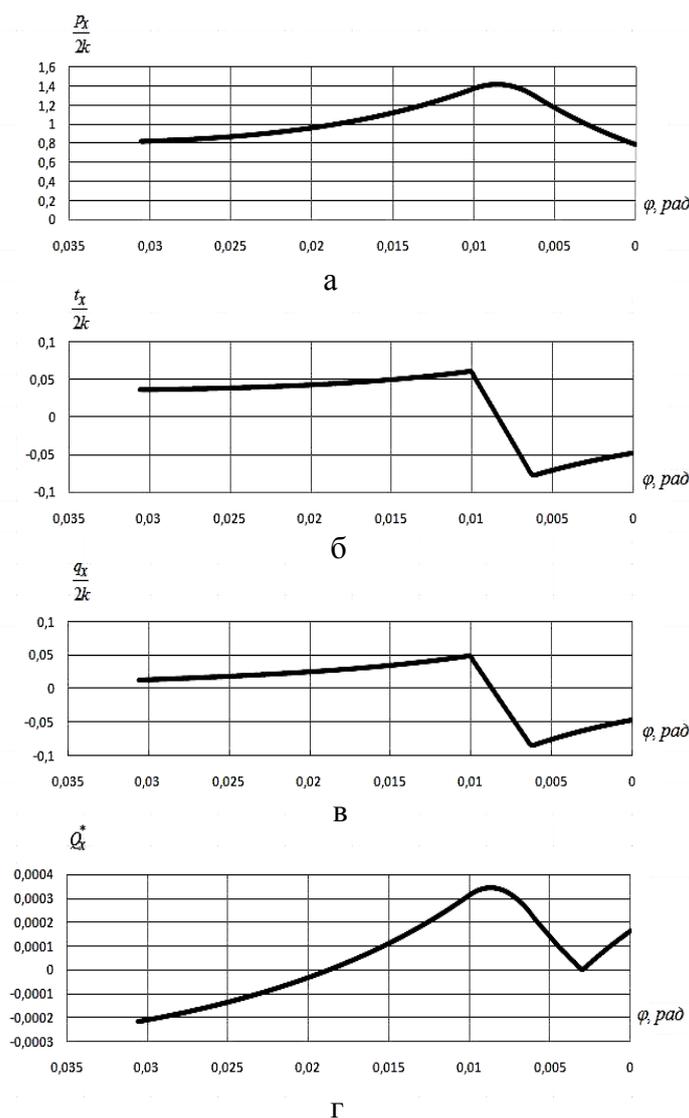


Рис. 3. Эпюры изменения по длине очага деформации контактных (а, б) и горизонтальных напряжений (в), а также силы  $Q_x^*$  (г) по предлагаемому режиму

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Максименко О. П. Оценка устойчивости процесса прокатки по опытным эпюрам контактных напряжений / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 2. – С. 110–114.
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 «КПІ»*. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – № 59. – С. 161–164. – (Серія «Машинобудування»).
3. 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.
4. Василев Я. Д. Производство жести методом двойной прокатки / Я. Д. Василев, А. В. Дементиев, С. Г. Горбунков. – М. : Металлургия, 1994. – 124 с.

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

Романюк Р. Я. – аспирант ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,  
г. Днепродзержинск.

E-mail: r22roma@mail.ru