



Максименко О. П. /д. т. н./
ДГТУ



Измайлова М. К. /к. т. н./
ДГТУ



Лобойко Д. И.
ДГТУ

Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжения полосы

В статье проведен анализ продольных сил в очаге деформации при простом процессе прокатки. Была аргументирована возможность выделения результирующей продольных сил в очаге деформации. На основе этого была уточнена методика определения продольной устойчивости прокатки с натяжением. Показано, что с увеличением натяжения полосы уменьшается результирующая продольных сил, а, следовательно, снижается устойчивость процесса прокатки. Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: натяжение, продольная устойчивость, очаг деформации

The article analyzes the longitudinal forces in the rolling gap at process rolling. The possibility of allocating resultant of longitudinal forces in the deformation zone was argumentation. On the basis of this was verified by methods determining the longitudinal stability of rolling with tension of. It is shown that with increasing strips tension of, the resulting longitudinal forces is reduced, and hence the rolling resistance is reduced.

Keywords: tension of, longitudinal stability, the rolling gap

В работе [1] приведена новая методика оценки предельной захватывающей способности валков и продольной устойчивости полосы в очаге деформации. В основе этой методики лежит расчет результирующей внутренних продольных сил пластически деформируемого металла. Насколько является обоснованным такой подход и может ли вообще быть выделена эта результирующая? Ведь согласно основного закона теоретической механики сумма внутренних сил в подвижной среде равна нулю [2], т. е. $\sum F_{iy} = 0$.

В процессе движения этой среды расстояние между материальными точками постоянно, оно не изменяется во времени, что справедливо для абсолютно твердого тела. По этой причине внутренние силы не совершают работу, и потенциальная энергия суммы материальных точек остается неизменной. Если записать уравнение полной потенциальной энергии:

$$V = \sum V_i + \frac{1}{2} \sum V_{iy},$$

где $\sum V_i$ и $\frac{1}{2} \sum V_{iy}$ – потенциальная энергия внешних и внутренних сил; то второй член пра-

вой части этого уравнения при рассматриваемых условиях является постоянной величиной. В случае, если материальные точки системы движутся с разными скоростями, что характерно для сплошной пластически деформируемой среды, $\sum F_{iy}$ может быть и не равной нулю и, что весьма важно, может изменяться во времени. В результате при движении материальных точек этой среды совершается работа внутренних сил. При этом каждая точка системы получает ускорение в продольном направлении [3]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x.$$

Первый член правой части этого выражения показывает изменение скорости данной точки во времени (при стационарном процессе эта составляющая равна нулю). Второй член характеризует переносное изменение скорости точки в результате пластической деформации при движении ее вдоль очага деформации. Эта составляющая ускорения, являясь результатом пластической деформации, практически всегда не равна нулю. Из чего следует, что в очаге деформации при движении материальных точек возникают внутренние динамические силы.

Аргументы, приведенные выше, позволяют утверждать, что в пластически деформируемой среде, которой является очаг деформации, можно выделить результирующую продольных сил, отражающую совокупность действия материальных точек этой среды. В работе [1] она представлена следующим уравнением в безразмерном виде:

$$Q_{српр}^* = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha Q_{хпр}^* d\varphi,$$

$$Q_{хпр}^* = \frac{\sigma_x}{2k} \left(\frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right),$$

где $Q_{хпр}^*$ – текущая продольная сила пластически деформируемого металла; α – угол захвата; φ – текущий угол в очаге деформации; $2k$ – сопротивление деформации металла; R – радиус валков.

Заметим, что $Q_{српр}^*$ является силой сопротивления и направлена противоположно движению полосы.

Для обеспечения равновесия в очаге деформации втягивающим металл в валки силам необходимо преодолеть, наряду с выталкивающими силами, и результирующую $Q_{српр}^*$. Равновесие в очаге деформации с учетом этой силы возможно только при смещении нейтрального сечения в сторону выхода металла из валков на величину, соответствующую приросту втягивающих сил $2Q_{\bar{m},\bar{\epsilon}}^*$, при условии, что $2Q_{\bar{m},\bar{\epsilon}}^* = Q_{\bar{m},\bar{\delta}}^*$.

В соответствии с [1] прирост втягивающих сил за счет смещения нейтрального сечения равен $Q_{\bar{m},\bar{\epsilon}}^* = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha Q_{\delta\bar{\epsilon}}^* d\varphi$, где $Q_{\delta\bar{\epsilon}}^*$ – текущая контактная горизонтальная сила:

$$Q_{\delta\bar{\epsilon}}^* = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha \left(-\frac{px}{2k} \sin \varphi + \frac{tx}{2k} \cos \varphi \right) d\varphi.$$

Подводя итог этой части исследования отметим, что учет результирующей продольных сил пластически деформируемого металла $Q_{\bar{m},\bar{\delta}}^*$ снижает предельную захватывающую способность валков в установившемся режиме прокатки, по данным работы [1] до $\alpha_{\delta}^{\max} \approx 1,5f_y$ и менее.

Методика [1] разработана для простого процесса прокатки. Оценим продольную устойчивость полосы в очаге деформации при деформации металла с натяжением. В качестве примера рассчитаем результирующую продольных сил при горячей прокатке в чистовой группе клетей тонколистового стана 1680. Режим обжатий при прокатке листовой стали (Зкп) поперечными размерами 3x1400 мм взят из [4] и приведен в табл. 1. Среднее сопротивление деформации металла, коэффициент трения и другие

параметры рассчитывали по известным методикам [4, 5]. Для удобства анализа все расчетные величины представлены в безразмерной форме, в том числе и удельное натяжение полосы: $q_{0i} = \frac{\sigma_{0i}}{2k_{i-1}}; q_{1i} = \frac{\sigma_{1i}}{2k_i}$, где σ_{0i} и σ_{1i} – удельное заднее и переднее натяжения в i -клетки.

Таблица 1

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

№ клетки	h_1 , мм	ϵ , %	$\alpha_{y'}$, рад	$V_{\delta'}$, м/с	Опытная сила прокатки, $P_{он'}$, МН	$p_{ср'}$, МПа	f_y	t_r , °С	$l_{сн'}$, 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

Удельные натяжения по клетям чистовой группы стана приведены в табл. 2 и выбраны в соответствии с рекомендуемыми значениями [4]. Заметим, что натяжения полосы при входе в чистовую группу и на выходе из нее оставались постоянными, а между клетями изменяли в широких пределах от минимального значения до максимального.

Таблица 2

Значения удельных безразмерных натяжений по клетям чистовой группы стана 1680

№ клетки	q_0			q_1		
	мин.	ср.	макс.	мин.	ср.	макс.
5	0	0	0	0,04	0,28	0,4
6	0,04	0,28	0,4	0,04	0,2	0,36
7	0,04	0,2	0,36	0,05	0,14	0,26
8	0,05	0,14	0,26	0,03	0,2	0,35
9	0,03	0,2	0,35	0,02	0,2	0,25
10	0,02	0,2	0,25	0,01	0,01	0,01

При анализе продольной устойчивости полосы по клетям чистовой группы стана 1680 расчеты выполняли в соответствии с методикой [1]. Некоторые особенности, связанные с учетом влияния натяжения, рассмотрим на примере прокатки в 8-й клетке со средними натяжениями.

Результаты расчета контактных напряжений (а), продольного нормального напряжения $\frac{\sigma_{\delta}}{2k}$ (б) и текущей продольной силы $Q_{хпр}^*$ (в) приведены на рисунке.

Как следует из рис. 1в, текущее значение продольной силы $Q_{хпр}^*$ на концевых участках очага

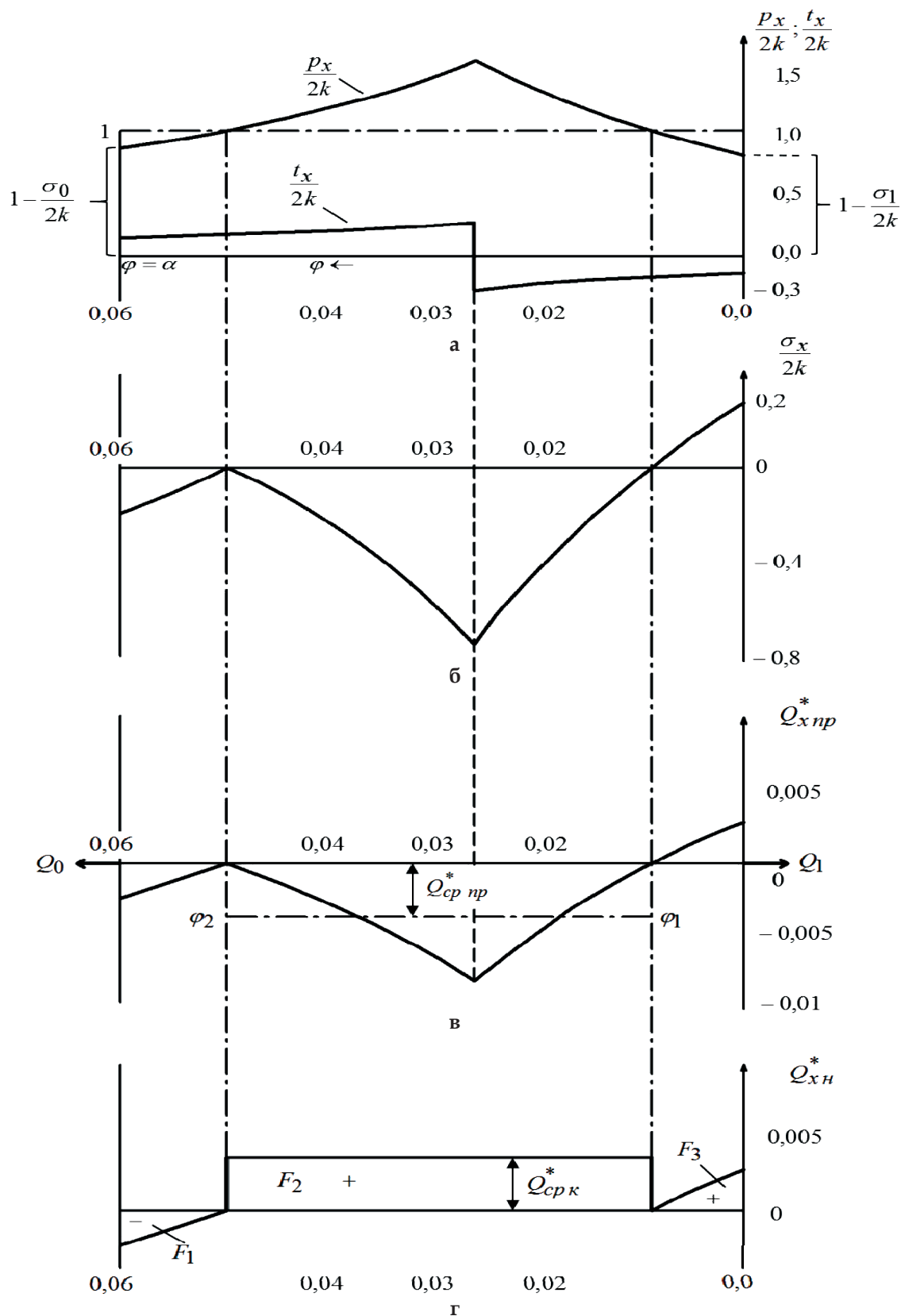


Рисунок. Эпюры контактных, горизонтальных нормальных напряжений и текущих продольных сил

деформации в значительной мере определяется внешними силами Q_0 и Q_1 (заднее и переднее натяжения полосы), а в средней части внутренними сжимающими продольными напряжениями $\frac{\sigma_{\delta}}{2k}$.

При оценке продольной устойчивости прокатки с натяжением удобно вести анализ, оперируя только внешними силами. Поэтому на участке очага деформации, границы которого соответствуют углам φ_1 и φ_2 (рис. 1в) площадь под кривой $Q_{хпр}^*$ заменим равновеликий площадью прямоугольника: $Q_{српр}^*(\varphi_2 - \varphi_1)$.

Далее, учитывая, что $Q_{српр}^* = 2Q_{ср\epsilon}^*$ перейдем на этом участке от внутренних к контактным продольным силам (их направление соответствует ходу прокатки, что отражает знак «+» на рис. 1г).

Заметим, что контактную силу $2Q_{ср\epsilon}^*$ на рассматриваемом участке можно также определить и по [1], но при этом следует учесть натяжение:

$$2Q_{ср\epsilon}^* = 2 \left[\frac{\sigma_0 \left(\frac{h_1}{R} + \alpha^2 \right)}{2} + \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left(-\frac{p_x}{2k} \sin \varphi + \frac{t_x}{2k} \cos \varphi \right) d\varphi \right].$$

Если обозначить на рис. 1г площади участков $F_1; F_2$ и F_3 , то общая результирующая продольных внешних сил, с учетом переднего и заднего натяжения полосы, будет равна $2Q_{\bar{w}i}^* = \frac{-F_1 + F_2 + F_3}{\alpha}$.

Эта результирующая и будет характеризовать продольную устойчивость по клетям чистовой группы стана 1680. Если $2Q_{\bar{w}i}^*$ положительна, то процесс в данной клетке совершается устойчиво. Как видно, при заданных удельных натяжениях, режиме обжаты и условиях трения процесс прокатки в 8-й клетке протекает без нарушений ($2Q_{\bar{w}i}^* = 0,0056$). Аналогично рассчитывали значения этой силы по всем клетям чистовой группы стана с разными натяжениями.

Результаты расчета приведены в табл. 3. Анализируя эти данные можно сделать следующий вывод: с увеличением удельного натяжения полосы продольная устойчивость процесса снижается. При прокатке с максимальными натяжениями в шестой и седьмой клетях возможна пробуксовка, т. к. результирующая $2Q_{\bar{w}i}^*$ в этих

клетях является отрицательной, а в девятой клетке процесс будет совершаться в условиях близких к предельным.

Таблица 3

Значения результирующей продольных сил в очагах деформации чистовой группы клетей

Удельные напряжения полосы	Номер клетей					
	5	6	7	8	9	10
	Значение результирующей $2Q_{\bar{w}i}^*$					
Минимальные	0,056	0,0268	0,015	0,0102	0,01	0,0068
Средние	0,044	0,0036	0,006	0,0056	0,0042	0,0036
Максимальные	0,04	-0,008	-0,003	0,00154	0,00016	0,0026

Выводы

Проведен анализ продольных сил в очаге деформации при простом процессе прокатки. Аргументирована возможность выделения результирующей внутренних сил пластически деформируемого металла. Уточнена методика определения продольной устойчивости процесса при прокатке с натяжением полосы. Показано, что при непрерывной прокатке с увеличением удельного натяжения полосы результирующая сила $2Q_{\bar{w}i}^*$ уменьшается. Следовательно, одним из существенных ограничений при выборе режима натяжений является продольная устойчивость полосы в очагах деформации непрерывной группы клетей.

Библиографический список

1. Максименко О. П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, Р. Я. Романюк // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2013. – № 6. – С. 47-49.
2. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. *Курс теоретической механики*, в 2-х томах. Т. II. Динамика. – М.: Наука, 1983. – 640 с.
3. Седов Л. И. *Механика сплошной среды* / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1976. – 536 с.
4. Сафьян М. М. *Прокатка широкополосной стали* / М. М. Сафьян. – М.: *Металлургия*, 1969. – 460 с.
5. Василев Я. Д. *Производство полосовой и листовой стали* / Я. Д. Василев, М. М. Сафьян. – К.: «Вища школа», 1976. – 192 с.

Поступила 02.08.2014