

УДК 629.771.23

*к.т.н. Жильцов А. П.,  
к.ф.-м.н. Харитоненко А. А.  
(ЛГТУ, г. Липецк, Россия, kaf-mo@stu.lipetsk.ru)*

## ФОРМИРОВАНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПРИ НАМОТКЕ ПОЛОСЫ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

*Проведено исследование колебаний натяжения на всех участках непрерывного стана от разматывателя до моталки. Представлены характеристики колебаний натяжения. Приведены результаты спектрального анализа кривых изменения натяжения. Разработана динамическая модель формирования натяжения полосы при намотке, включающая в себя модель движения рулона в вертикальной плоскости и деформации полосы.*

**Ключевые слова:** тонколистовая прокатка, непрерывный стан, натяжение, моталка, колебания, динамика.

**Введение.** Переднее и заднее натяжения полосы при прокатке оказывают существенное влияние на энергосиловые параметры в очаге деформации, геометрию и форму проката. Так, для широкополосных станов горячей прокатки важным является оценка влияния технологических и конструктивных параметров и технического состояния оборудования на динамические нагрузки, влияния взаимодействия клетей на межклетевые усилия и продольную разнотолщинность [1]. Особенно важным влияние натяжения на качество проката является для тонколистовых станов холодной прокатки, качество продукции которых оценивается жёсткими допусками по геометрии и планшетности. Требуемые значения и стабильность показателей качества обеспечивают соответствующие системы автоматического регулирования.

**Экспериментальная часть.** Для большинства непрерывных станов холодной прокатки характерным при обеспечении натяжения является наличие начального этапа намотки продолжительностью 30–60 секунд, в течение которого режим натяжения от повышенных значений снижается до среднего значения, которое в дальнейшем остаётся постоянным. Вместе с тем наблюдается существенная нестабильность и колебательный характер изменения натяжения в межклетевых промежутках и за послед-

ней клетью, характер изменения натяжения меняется также по длине рулона [2, 3, 4].

Колебания натяжения имеют квазистационарный характер и представляют полигармонический процесс со значимыми частотами в диапазоне до 10 Гц, при этом наибольшей мощностью в спектре обладают угловые частоты рабочих и опорных валков, смежных с межклетьевым промежутком, а также моталок.

Для первых двух межклетевых промежутков максимальная мощность соответствует угловой частоте рабочих валков предыдущей клетки, а для последних двух — угловой частоте вращения опорных валков последующей клетки.

Для последнего межклетьевого промежутка максимальную мощность в спектре колебаний натяжения составляет частота, соответствующая угловой частоте моталки. То есть возмущение от моталки проходит через очаг деформации последней клетки непрерывного стана. В этом случае можно предположить, что для последней клетки основным возмущением переднего натяжения является нестабильность положения рулона вследствие деформации барабана моталки (прогиба) и его вращений в деформированном состоянии вместе с наматываемым рулоном. Возникающие при этом деформации полосы между моталкой и прокатной клетью обуславливают изменения натяжения.

Для стабилизации качества полосы необходимо стабилизировать натяжение между последней клетью стана и моталкой. Намотка полосы осуществляется на барабан, конструктивно представляющий собой вращающуюся консольную балку, что обусловлено необходимостью снятия рулона с барабана в осевом направлении, при этом под действием нагрузок (вес рулона и натяжение полосы) барабан моталки прогибается.

При вращении изогнутого барабана рулон перемещается относительно геометрической оси по сложной траектории, параметры которой зависят от приложенных нагрузок: массы рулона, упругих характеристик барабана, полосы и опор.

Изменение фактического положения рулона относительно геометрического центра приводит к изменению деформации полосы между рулоном и последней клетью стана, удельного и полного натяжения. Очевидно, что деформация полосы определяется параметрами траектории движения рулона и барабана как динамической системы, физическая модель которой приведена на рисунке 1 и представляет собой материальную точку массой  $m$  на упругих горизонтальной и вертикальной опорах с жёсткостями  $K_G$  и  $K_B$ , движущуюся под действием сил:  $G$  (вес рулона),  $T$  (натяжение полосы) и вращающейся со скоростью  $\omega$  центробежной силы  $F$ .

Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{G}{m} - \frac{k}{m} \cdot x - \frac{c}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + \omega^2 r \cos \omega t; \\ \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{k}{m} \cdot y - \frac{c}{m} \cdot \frac{dy}{dt} + \omega^2 r \sin \omega t, \end{cases}$$

где  $r = \frac{1}{m} \sqrt{x^2 + y^2}$ .

Решение системы уравнений осуществляли методом Рунге – Кутты в программной среде Mathcad. Расчётные траектории движения рулона при  $m=30$  т,  $\omega=35$  рад/с,  $T=10$  кН и различных начальных условиях представлены на рисунке 2.

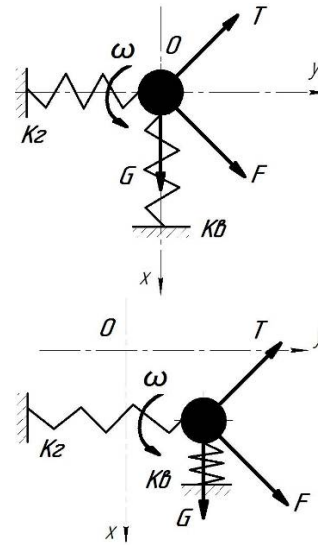
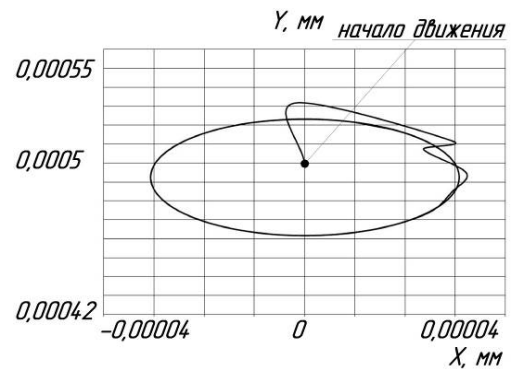
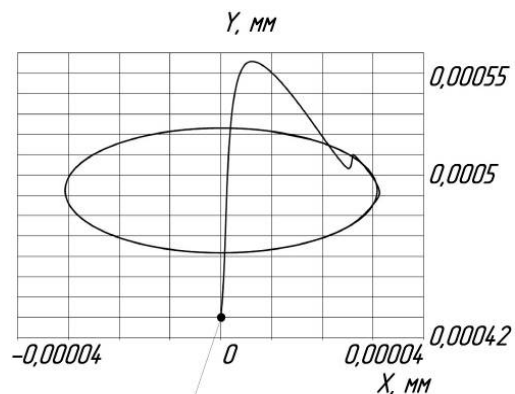


Рисунок 1 Механическая модель движения центра тяжести рулона



а)



б)

Начальные условия:

а)  $x_0=0,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $v_x^0=0$ ,  $y_0=0$ ,  $v_y^0=17 \cdot 10^{-3}$ ;  
 б)  $x_0=0,43 \cdot 10^{-3}$ ,  $v_x^0=0$ ,  $y_0=0$ ,  $v_y^0=8 \cdot 10^{-3}$

Рисунок 2 Расчётные траектории движения рулона

Установлено, что в обоих случаях совершаемые движения выходят на предельный цикл с одинаковыми параметрами. Характер движения рулона по осям X и Y, соответствующий предельному циклу, представлен на рисунке 3.

В настоящее время на ряде современных тонколистовых станов холодной прокатки применяется схема, конструктивно представляющая собой контропору, в виде 2-х роликов, подводимых к свободному концу барабана во время смотки рулона с помощью гидроцилиндров (рис. 4). Такая схема позволяет частично уменьшить прогиб барабана с рулоном. Кроме этого, применение гидравлического цилиндра приводит к необходимости рассматривать опору консоли как упругую (податливую), но, так как жидкость в гидроцилиндре не воспринимает растягивающих нагрузок, опора эта односторонняя, работающая только на сжатие. Конструкция опоры обуславливает различия жёсткости в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

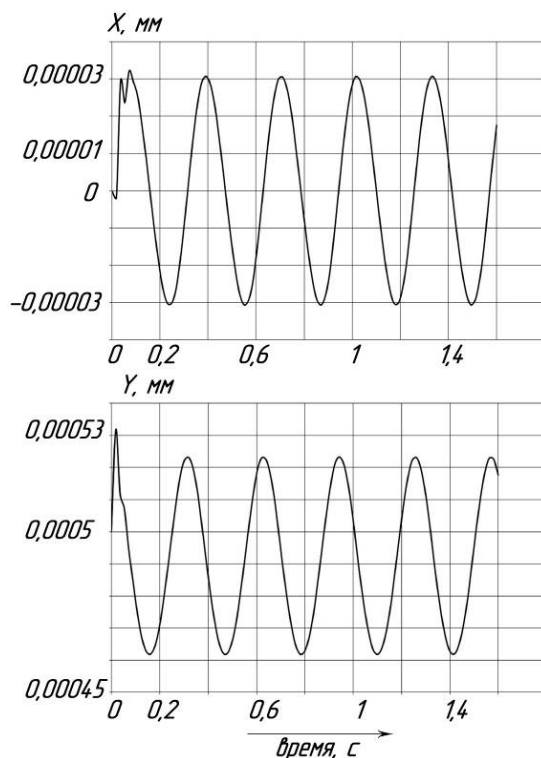


Рисунок 3 Изменения координат X и Y для предельного цикла движения

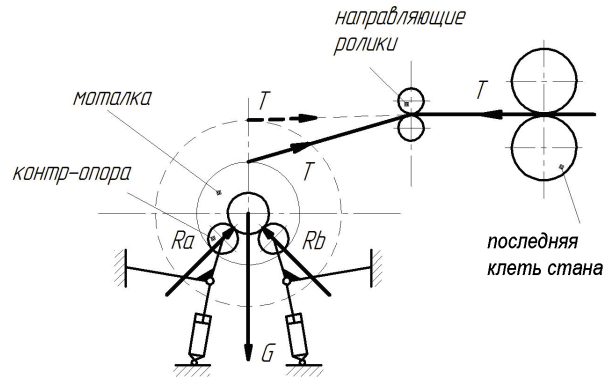


Рисунок 4 Конструкция моталки с контропорами

Натяжение полосы является следствием её деформации между моталкой и последней клетью стана и в расчётной динамической модели может быть представлено упругим элементом, который работает только на растяжение, так как при действии сжимающих нагрузок тонкая полоса теряет устойчивость.

Для определения связи натяжения в полосе с положением рулона была построена геометрическая модель намотки полосы на моталку (рис. 5, а). В данной модели приняты следующие упрощения: точки касания полосы с рулоном и с направляющими роликами находятся на вертикальной оси рулона, а в ходе намотки рулон смещается относительно оси вращения и в результате смещается точка касания (рис. 5, б). При этом деформация полосы равна

$$\Delta l = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos(\beta - \alpha),$$

где  $\alpha$  — угол наклона полосы к первоначальной точке касания, принятый постоянным.

Выражая угол  $\beta$  через геометрические размеры, после преобразования получили

$$\Delta l = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{1 + \left( \frac{xL - y(H - R)}{1 + (L + y) + (H - R)^2 + x(H - R)} \right)^2}},$$

$$\Delta T = S \cdot E \cdot \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{l_0} \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{xL - y(H - R)}{1 + (L + y) + (H - R)^2 + x(H - R)} \right)^2}$$

где  $S$  — площадь сечения полосы;  $E$  — модуль упругости стали;  $H$  и  $L$  — расстояния между осями барабана моталки и направляющих роликов;  $R$  — радиус рулона;  $x$  и  $y$  — смещение рулона по осям;  $l_0$  — длина полосы, принятая постоянной.

Полное натяжение равно

$$T = T_0 + \Delta T,$$

где  $T_0$  — натяжение в начале намотки.

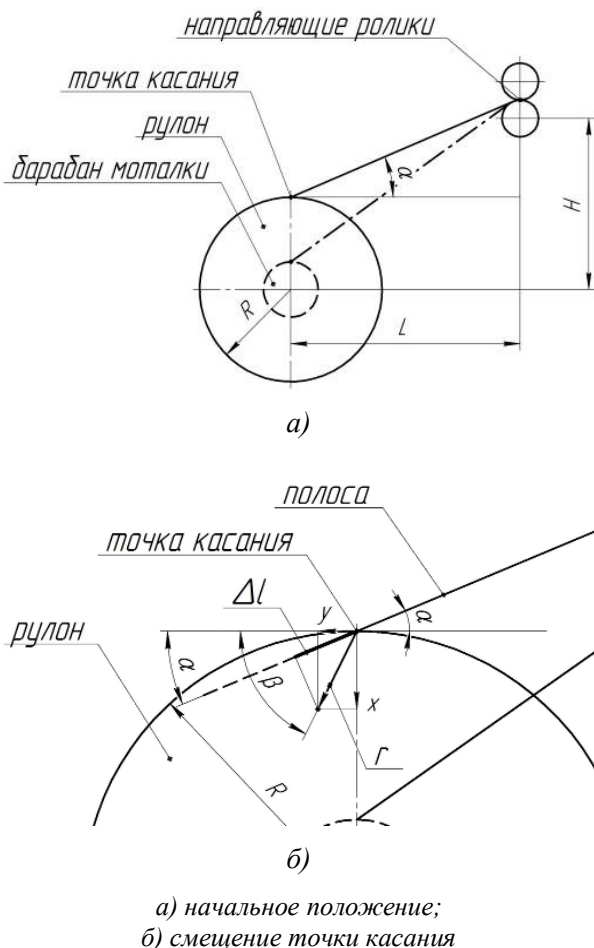


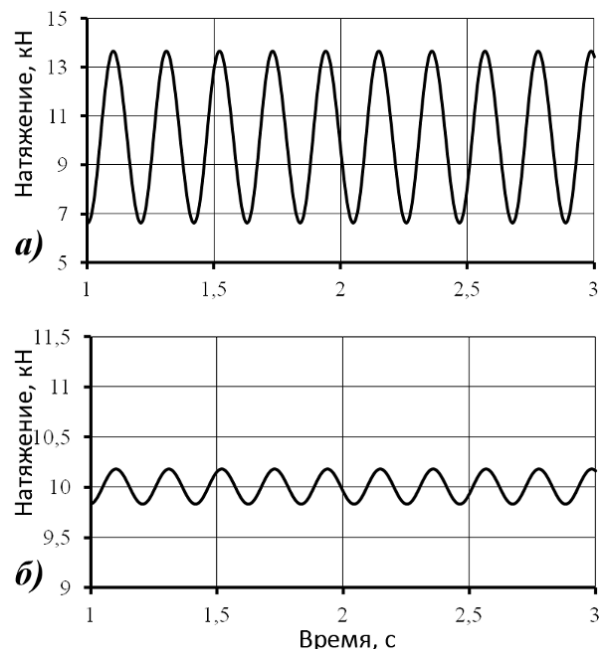
Рисунок 5 Геометрическая модель намотки полосы

Используя полученное выражение, определили натяжение в полосе между последней клетью и моталкой со свободным концом барабана (рис. 6, а) и с абсолютно жёсткой опорой (рис. 6, б).

Для обоих случаев разными являются только коэффициенты жёсткости  $k_1=5,5 \cdot 10^8$  Н/м и  $k_2=25,14 \cdot 10^8$  Н/м, геометрические параметры и натяжение  $T_0$  одинаковы. В случае с опорой величина натяжения имеет размах колебаний на порядок меньший по сравнению с безопорным барабаном.

Представленная на рисунке 7 осциллограмма натяжения получена для реальных данных.

При этом осуществлялось моделирование изменения натяжения в промежутке между барабаном моталки с податливой концевой опорой и последней клетью стана при прокатке полосы из стали 20пс  $0,5 \times 1280$  мм. В качестве исходных параметров модели приняли:  $T_0=17,4$  кН,  $S=640$  мм<sup>2</sup>,  $l_0=3$  м,  $R=950$  мм,  $m=5$  т,  $k=15 \cdot 10^8$  Н/м.



а) моталка со свободным концом барабана;  
б) моталка с абсолютно жёсткой опорой

Рисунок 6 Натяжение полосы

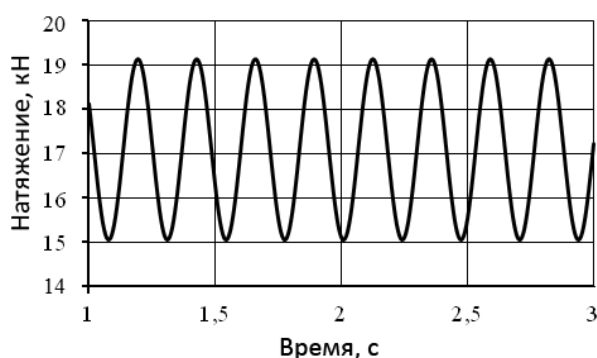


Рисунок 7 Оциллограмма натяжения, полученная моделированием для реального профиля

**Выводы.** Анализ изменения натяжения в промежутке между барабаном моталки и последней клетью стана показал, что характер изменения натяжения является периодическим с основной частотой, равной угловой частоте вращения барабана моталки, т. е. возмущения со стороны барабана моталки с податливой концевой опорой передаются в очаг деформации последней клетки с размахом до 4,2 кН. Это приводит к существенному изменению удельного натяжения в очаге деформации в пределах 22 % ( $2,34 \div 3,0$  МПа) и необходимости учёта возмущений со стороны моталки при настройке технологических параметров последней клетки стана.

### Библиографический список

1. Вернев, В. В. *Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680* [Текст] : монография / В. В. Вернев, В. И. Большаков и др. — Днепропетровск : ИМА-пресс, 2011. — 184 с.
2. Маслов, Е. А. *Алгоритм обработки информации о натяжении полосы для идентификации вибраций на станах бесконечной прокатки на основе вейвлет-преобразования* [Текст] / Е. А. Маслов, К. А. Харахнин, А. В. Кожневиков // *Производство проката*. — 2010. — № 10. — С. 36–39.
4. Синицкий, В. М. *Стальная полоса в межвалковом пространстве стана холодной прокатки как колебательная структура* [Текст] / В. М. Синицкий, Ю. В. Рыбаков // *Производство проката*. — 2002. — № 5. — С. 18–20.
5. Усов, С. В. *Математическое моделирование процесса намотки тонкой стальной полосы в рулон* [Текст] / С. В. Усов, В. Н. Мещеряков // *Известия ТулГУ. Технические науки*. — 2014. — Вып. 10. Ч. 2. — С. 157–162.

© Жильцов А. П.

© Харитоненко А. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ТМ ЛГТУ Козловым А. М., к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульянищким В. Н.*

Статья поступила в редакцию 12.10.18.

к.т.н. Жильцов О. П., к.ф.-м.н. Харитоненко А. А. (ЛДТУ, м. Липецк, Росія, kaf-mo@stu.lipetsk.ru)

### ФОРМУВАННЯ НАТЯГУ ПРИ НАМОТУВАННІ СМУГИ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Проведено дослідження коливань натягу на всіх ділянках безперервного стану від розмотувача до моталки. Представлено характеристики коливань натягу. Наведено результати спектрального аналізу кривих зміни натягу. Розроблено динамічну модель формування натягу смуги при намотуванні, що включає в себе модель руху рулону у вертикальній площині і деформації смуги.

**Ключові слова:** тонколистова прокатка, безперервний стан, натяг, моталка, коливання, динаміка.

**PhD Zhiltsov A. P., PhD in Physical and Mathematical Sciences Kharitonenko A. A.** (*LSTU, Lipetsk, Russia, kaf-mo@stu.lipetsk.ru*)

**FORMATION OF TENSION WHILE WINDING THE STRIP UNDER THE DYNAMIC LOADING CONDITIONS**

*The study of tension oscillations has been conducted in all areas of the continuous rolling mill from the decoiler to the winder. The characteristics of tension oscillations are presented. The results of the spectral analysis of the tension change curves are given. There has been developed the dynamic model of the strip tension formation while winding, that includes a model of the winder motion in a vertical plane and the strip deformation.*

**Key words:** *thin-strip rolling, continuous mill, tension, winder, oscillations, dynamics.*