

Расчет и проектирование машиностроительных
конструкций

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛОСЫ
В УСЛОВИЯХ ОДНО- И ДВУХЗОННОЙ ПРОКАТКИ**

Л.С. КОХАН *д-р техн. наук, проф.*,

Ю.А. МОРОЗОВ *канд. техн. наук, доц.,**

Ю.Б. СЛАВГОРОДСКАЯ, *аспирант.*

*Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
111250, Москва, Б. Семеновская, 38, т. 8(916)877-66-96*; akafest@mail.ru**

Сравниваются энергосиловые параметры свободной прокатки полосы без натяжения и прокатки с одним участком отставания и опережения по очагу деформации. Приводятся зависимости выбора предельных значений заднего и переднего натяжений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прокатка, деформация, натяжение, нейтральное сечение, прокатка однозонная, давление прокатки.

Кинематика формоизменения полосы при прокатке обуславливает деление очага деформации на две зоны: отставание и опережение (рис. 1) [1-3].

женное процессом холодной прокатки полосы толщиной $h_0 = 5,0$ мм в валках с катающим радиусом $R = 150$ мм и обжатием 20%.

Угол захвата полосы валками и основной параметр прокатки:

$$\alpha = \sqrt{\frac{h_0}{R}} \varepsilon = \sqrt{\frac{5,0}{150}} 0,2 = 0,0816 \text{ рад (4,68 град); } \delta = \frac{2f}{\alpha} = \frac{2 \cdot 0,15}{0,0816} = 3,676,$$

где $f = 0,1 \dots 0,15$ – коэффициент трения при холодной прокатке.

Толщина полосы на выходе из очага деформации

$$h_1 = h_0 (1 - \varepsilon) = 5,0 (1 - 0,2) = 4,0 \text{ мм.}$$

Коэффициент упрочнения материала полосы и величина предельного коэффициента заднего натяжения для создания однозонной прокатки отставания [4-6]:

$$k_{\text{упр}} = 1,0 + \varepsilon = 1,0 + 0,2 = 1,2;$$

$$\xi_{0 \text{ min}} = \frac{(\delta - k_{\text{упр}})(1 - \varepsilon)^\delta + k_{\text{упр}}}{\delta} = \frac{(3,676 - 1,2)(1 - 0,2)^{3,676} + 1,2}{3,676} = 0,623.$$

Таким образом, чтобы процесс прокатки не перешел в растяжение, необходимо выполнение условия

$$\xi_0 \geq \xi_{0 \text{ min}}.$$

Для построения эпюры нормальных напряжений, горизонтальную проекцию дуги захвата условно разделяем на четыре части:

$$l = \sqrt{R h_0 \varepsilon} = \sqrt{150 \cdot 5,0 \cdot 0,2} = 12,2 \text{ мм,}$$

тогда для выбранной координаты $x_i = l/4 = 12,2/4 = 3,05$ мм и соответствующей толщины полосы [7]:

$$h_i = h_1 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x_i^2} \right) = 4,0 + 2 \left(150 - \sqrt{150^2 - 3,05^2} \right) = 4,062 \text{ мм.}$$

Нормальное давление на участке отставания (1а):

$$\bar{\sigma}_{z \text{ от}} = \frac{\sigma_T}{3,676} \left[(0,623 \cdot 3,676 - 1,2) \left(\frac{5,0}{4,062} \right)^{3,676} + 1,2 \right] = 0,963 \sigma_T.$$

Аналогичные расчеты, сделанные для других координат очага деформации, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Контактное давление в очаге деформации при однозонной прокатке

x_i/l	h_i , мм	Натяжение при прокатке	
		заднее ($\xi_0 = 0,623$), $\bar{\sigma}_{z \text{ от}}$	переднее ($\xi_1 = 0,258$), $\bar{\sigma}_{z \text{ оп}}$
0,0	4,000	1,000	0,258
1/4	4,062	0,963	0,292
1/2	4,248	0,866	0,403
3/4	4,559	0,743	0,619
1,0	5,000	0,623	1,000

Таким образом, решение подтверждает наличие одного участка отставания по границам очага деформации при натяжении $\bar{\sigma}_{z \text{ от}} = \xi_0 = 0,623$.

Среднее напряжение на контакте:

$$\bar{\sigma}_{\xi_1=1,0}^{\xi_0=0,623} = \frac{\xi_0 + \sum \bar{\sigma}_{z \text{ от}} + \xi_1}{n} \sigma_T = \frac{0,623 + 0,963 + 0,866 + 0,743 + 1,0}{5} \sigma_T = 0,839 \sigma_T.$$

Распределение нормального напряжения по дуге захвата, представлено на рис. 2. Далее, при заявленных параметрах деформации, исследуем напряженное состояние двухзонной прокатки. Для этого увеличиваем коэффициент заднего натяжения $\xi_0 = 0,7$, что обеспечит появление участка опережения.

При соотношениях

$$\frac{h_0}{h_1} = \frac{h_n}{h_1} = \frac{1}{1 - \varepsilon}$$

и отсутствии переднего натяжения $\xi_1 = 1,0$ относительная высота нейтрального сечения [8]:

$$Z_0 = \frac{h_n}{h_1} = \left[\frac{\sqrt{k_{\text{упр}}^2 + \frac{(\xi_0 \delta - k_{\text{упр}})(\delta + k_{\text{упр}})}{(1 - \varepsilon)^\delta} - k_{\text{упр}}}}{\xi_0 \delta - k_{\text{упр}}} \right]^{\frac{1}{\delta}} = \quad (2)$$

$$= \left[\frac{\sqrt{1,2^2 + \frac{(0,7 \cdot 3,676 - 1,2)(3,676 + 1,2)}{(1 - 0,2)^{3,676}} - 1,2}}{0,7 \cdot 3,676 - 1,2} \right]^{\frac{1}{3,676}} = 1,223.$$

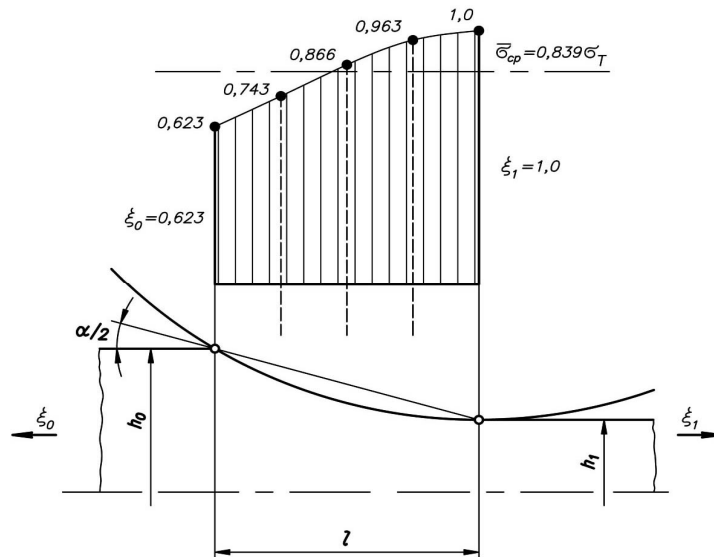


Рис. 2. Эпюра контактного давления по дуге захвата

Толщина полосы в нейтральном сечении:

$$h_n = h_0 / Z_0 = 5,0 / 1,223 = 4,088 \text{ мм.}$$

Относительное давление на границе участков отставания и опережения (1):

$$\bar{\sigma}_{z \text{ от}} = \frac{\sigma_T}{3,676} \left[(0,7 \cdot 3,676 - 1,2) \left(\frac{5,0}{4,088} \right)^{3,676} + 1,2 \right] = 1,11 \sigma_T;$$

$$\bar{\sigma}_{z \text{ оп}} = \frac{\sigma_T}{3,676} \left[(1,0 \cdot 3,676 + 1,2) \left(\frac{4,088}{4,0} \right)^{3,676} - 1,2 \right] = 1,11 \sigma_T.$$

Различие менее 1% определяет правильность выбора высоты нейтрального сечения, что позволяет перейти к расчетам силовых параметров очага деформации.

Относительное давление в нейтральном сечении устанавливаем как среднеарифметическое:

$$\bar{\sigma}_n = \frac{\bar{\sigma}_{z \text{ от}} + \bar{\sigma}_{z \text{ оп}}}{2} = \frac{1,11 + 1,11}{2} \sigma_T = 1,11 \sigma_T.$$

Среднее давление прокатки:

$$\bar{\sigma}_{\text{cp}}^{\xi_0=0,65, \xi_1=1,0} = \frac{\xi_0 + 2\bar{\sigma}_n + \xi_1}{n} = \frac{0,7 + 2 \cdot 1,11 \sigma_T + 1,0}{4} = 0,98 \sigma_T.$$

Отметим, что различие в сравнении со свободной прокаткой

$$\Delta = \frac{\bar{\sigma}_{\text{cp}}^{\xi_0=0,7, \xi_1=1,0} - \bar{\sigma}_{\text{cp}}^{\xi_0=0,623, \xi_1=1,0}}{\bar{\sigma}_{\text{cp}}^{\xi_0=0,7, \xi_1=1,0}} 100\% = \frac{0,98 - 0,839}{0,98} 100\% = 14,11\%.$$

Далее рассматриваем свободную прокатку, т.е. при отсутствии натяжения полосы $\xi_0 = \xi_1 = 1,0$, относительная высота нейтрального сечения (2) $Z_0 = 1,153$ и толщина полосы в нейтральном сечении:

$$h_n = h_0 / Z_0 = 5,0 / 1,153 = 4,337 \text{ мм.}$$

Относительное давление на границе участков отставания и опережения (1):

$$\bar{\sigma}_{z \text{ от}} = 1,463 \sigma_T \text{ и } \bar{\sigma}_{z \text{ оп}} = 1,459 \sigma_T.$$

С различием менее 1%, относительное давление в нейтральном сечении $\bar{\sigma}_i = 1,461 \sigma_T$ и среднее давление прокатки:

$$\bar{\sigma}_{\text{cp}}^{\xi_0=1,0, \xi_1=1,0} = 1,231 \sigma_T.$$

Переходим к прокатке с преобладанием переднего натяжения. Величина предельного коэффициента переднего натяжения:

$$\xi_{1 \text{ min}} = \frac{(\delta + k_{\text{упр}})(1 - \varepsilon)^\delta - k_{\text{упр}}}{\delta} = \frac{(3,676 + 1,2)(1 - 0,2)^{3,676} - 1,2}{3,676} = 0,258.$$

Для координаты $x_i = l/4 = 3,05$ мм и соответствующей толщине полосы $h_i = 4,062$ мм, относительное давление на участке опережения (1б):

$$\bar{\sigma}_{z \text{ оп}} = \frac{\sigma_T}{3,676} \left[(0,258 \cdot 3,676 + 1,2) \left(\frac{4,062}{4,0} \right)^{3,676} - 1,2 \right] = 0,292 \sigma_T.$$

Аналогичные расчеты, сделанные для других координат очага деформации, приведены в табл. 1. Среднее давление прокатки:

$$\bar{\sigma}_{\text{cp}}^{\xi_0=1,0, \xi_1=0,258} = \frac{\xi_0 + \sum \bar{\sigma}_{z \text{ оп}} + \xi_1}{n} \sigma_T = \frac{1,0 + 0,292 + 0,403 + 0,619 + 0,258}{5} \sigma_T = 0,514 \sigma_T.$$

При отсутствии заднего натяжения $\xi_0 = 1,0$, относительная высота нейтрального сечения [8]:

$$Z_1 = \frac{h_n}{h_1} = \left[\frac{\sqrt{k_{\text{упр}}^2 + \frac{(\xi_1 \delta + k_{\text{упр}})(\delta - k_{\text{упр}})}{(1 - \varepsilon)^\delta}} - k_{\text{упр}}}{\delta - k_{\text{упр}}} \right]^{\frac{1}{\delta}}.$$

Ниже представлено среднее давление, рассчитанное для прокатки с различными комбинациями заднего и переднего натяжений (в случае дробного значения натяжений, поиск нейтрального сечения может осуществляться итерационным методом последовательных приближений) [9].

Вывод: Применение однозонной прокатки повышает физико-механические свойства полосы с помощью установления либо напряжения растяжения либо

Таблица 2. Среднее давление прокатки в очаге деформации

ξ_1	ξ_0				
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,623
1,0	1,231	1,153	1,069	0,980	0,839
0,9	1,179	1,103	1,022	0,936	0,864
0,8	1,127	1,053	0,974	0,891	0,821
0,7	1,073	1,001	0,925	0,845	0,777
0,6	1,017	0,948	0,875	0,798	0,733
0,5	0,961	0,894	0,824	0,750	0,689
0,4	0,902	0,839	0,771	0,700	0,642
0,3	0,841	0,781	0,717	0,650	0,595
0,258	0,514	0,756	0,694	0,628	0,574

напряжения сжатия, без переходов как это бывает при двухзонной прокатке. Тем самым обеспечиваются наименьшие давление прокатки и разнотолщинность полосы, что повышает эксплуатационные ее характеристики.

Л и т е р а т у р а

1. *Кохан Л.С., Морозов Ю.А.* Силовые и кинематические параметры очага деформации при тонколистовой прокатке // *Технология металлов.* – М.: Наука и технологии, 2013. – Вып. 3. – С. 10-13.
2. *Shuixuan Chen, Weigang Li, Xianghua Liu.* Calculation of rolling pressure distribution and force based on improved Karman equation for hot strip mill // *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 89, December 2014. – Pp. 256-263.
3. *Kazeminezhad M., Karimi Taheri A.* Calculation of the rolling pressure distribution and force in wire flatrolling process // *Journal of Materials Processing Technology.* – Vol. 171, Iss. 2, 20 January 2006. – Pp. 253-258.
4. *Кохан Л.С., Морозов Ю.А.* Исследование механизма натяжения при прокатке // *Механика XXI века. XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов.* – Братск: БрГУ, 2012. – С. 77-82.
5. *Кохан Л.С., Шульгин А.В., Славгородская Ю.Б.* Разработка методики расчета давления при прокатке с однозонным контактом отставания // *Технология металлов.* – М.: Наука и технологии, 2015. – Вып. 7. – С. 11-15.
6. *Кохан Л.С., Алдунин В.В., Славгородская Ю.Б.* Снижение давления проката при однозонном опережении // *Технология металлов.* – М.: Наука и технологии, 2015. – Вып. 8. – С. 19-23.
7. *Кохан Л.С., Морозов Ю.А.* Интенсификация процессов прокатки // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2013. – № 1. – С. 15-18.
8. *Кохан Л.С., Коростелев А.Б., Морозов Ю.А., Алдунин А.В., Белелюбский Б.Ф., Винокуров А.Я.* Силовые и кинематические параметры продольной листовой прокатки. – М.: МГВМИ, 2012. – 432 с.
9. *Кохан Л.С., Белелюбский Б.Ф.* Влияние соотношения переднего и заднего натяжения на уменьшение энергосиловых параметров горячей прокатки и их стабилизацию // *Технология металлов.* – М.: Наука и технологии, 2011. – Вып. 12. – С. 15-18.

R e f e r e n c e s

1. *Kokhan, L.S., Morozov, Yu.A.* (2013). Silovye i kinematicheskie parametry ochaga deformatsii pri tonkolistovoj prokatke, *Tekhnologiya Metallov*, M.: Nauka i tekhnologii, Vyp. 3, p. 10-13.

2. Shuixuan Chen, Weigang Li, Xianghua Liu (2014). Calculation of rolling pressure distribution and force based on improved Karman equation for hot strip mill, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 89, December 2014, pp. 256-263.

3. Kazeminezhad, M, Karimi Taheri, A. (2006). Calculation of the rolling pressure distribution and force in wire flatrolling process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, Iss. 2, 20 January 2006, pp. 253-258.

4. Kokhan, L.S., Morozov, Yu.A. (2012). Issledovanie mekhanizma natyazheniya pri prokatke, *Mekhaniki XXI veku. XI Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: Sbornik dokladov*, Bratsk: BrGU, pp. 77-82.

5. Kokhan, L.S., Shul'gin, A.V., Slavgorodskaya, Yu.B. (2015). Razrabotka metodiki rascheta davleniya pri prokatke s odnozonnym kontaktom otstavaniya, *Tekhnologiya Metallov*, Moscow: Nauka i tekhnologii, Vyp. 7, pp. 11-15.

6. Kokhan, L.S., Aldunin, V.V., Slavgorodskaya, Yu.B. (2015). Snizhenie davleniya prokata pri odnozonnom operezhenii, *Tekhnologiya Metallov*, Moscow: Nauka i tekhnologii, Vyp. 8, pp. 19-23.

7. Kokhan, L.S., Morozov, Yu.A. (2013). Intensifikatsiya protsessov prokatki, *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsij i Sooruzhenij*, No 1, pp. 15-18.

8. Kokhan, L.S., Korostelev, A.B., Morozov, Yu.A., Aldunin, A.V., Beleyubskii, B.F., Vinokurov, A.Ya. (2012), *Silovye i Kinematicheskie Parametry Prodol'noj Listovoj Prokatki*, M.: MGVMI, 432 p.

9. Kokhan, L.S., Beleyubskij, B.F. (2011). Vliyaniye sootnosheniya perednego i zadnego natyazheniya na umen'sheniye ehnergosilovykh parametrov goryachej prokatki i ikh stabilizatsiyu, *Tekhnologiya Metallov*, Moscow: Nauka i tekhnologii, Vyp. 12, pp. 15-18.

STRIP TENSION UNDER CONDITIONS OF ONE - AND TWO-ZONAL ROLLING

L.S. Kokhan, Yu.A. Morozov, Yu.B. Slavgorodskaya
Moscow State Machine-Building University (MAMI), Moscow

Power parameters of free rolling of a strip without tension are compared to rolling with one site of lag and an advancing on the deformation center. Dependences of a choice of limit values of back and forward tension are given.

KEY WORDS: rolling, deformation, tension, neutral section, rolling one-zonal, rolling pressure.

