



УДК 621.771.068

DOI 10.17073/0368-0797-2021-1-7-13



ОБ АДЕКВАТНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПОЛОСЫ. СООБЩЕНИЕ 1. ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРВАЛ

С. М. Бельский, И. И. Шопин, А. Н. Шкарин

■ *Липецкий государственный технический университет* (Россия, 398055, Липецк, ул. Московская, 30)

Аннотация. Повышение уровня автоматизации металлургических агрегатов, связанных с развитием технологии и применением современных датчиков и измерительных систем, а также развитие промышленных информационных систем увеличивает количество доступных для анализа параметров производственных и технологических процессов. Следствием этого является увеличение сложности и длительности предварительной подготовки данных, поступающих от датчиков и измерительных систем, для последующего математического и статистического анализа. Поэтому весьма важно и актуально разрабатывать новые и совершенствовать существующие методики автоматизированного процесса первичной подготовки данных. При разработке методик первичной подготовки данных следует учитывать, что точность и адекватность результатов последующего математического анализа определяются точностью и адекватностью используемых исходных данных. Параметры профиля поперечного сечения горячекатаных полос, такие как клиновидность, выпуклость, разнотолщинность, смещение выпуклости, прикромочная клиновидность, локальные утолщения и утонения полосы являются расчетными параметрами, т. е. вторичны по отношению к фактическим измерениям толщины полосы по длине и ширине горячекатаных полос. По мере совершенствования технологии в цехах холодной прокатки тонколистовой стали растет число сортаментных групп, для которых технологические режимы обработки горячекатаных полос, осуществляющихся на агрегатах холодной прокатки и отделки стальных полос, а также маршруты их обработки выбирают, исходя из фактических значений параметров профиля поперечного сечения. Целью является последующее снижение вероятности образования несоответствующей продукции и повышенного расхода металла. В статье приведен обзор общепринятых методов расчета параметров профиля поперечного сечения горячекатаной полосы и дана оценка точности и адекватности применения усредненных по длине полосы параметров.

Ключевые слова: тонколистовая прокатка, профиль полосы, прикромочная клиновидность, вероятность обрыва, предсказательный интервал

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90257.

Для цитирования: Бельский С.М., Шопин И.И., Шкарин А.Н. Об адекватности параметров профиля поперечного сечения полосы. Сообщение 1. Предсказательный интервал // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 1. С. 7–13. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-7-13>

ON ADEQUACY OF PARAMETERS OF STRIP CROSS-SECTION PROFILE. PART 1. PREDICTIVE INTERVAL

S. M. Bel'skii, I. I. Shopin, A. N. Shkarin

■ *Lipetsk State Technical University* (30, Moskovskaya str., Lipetsk 398600, Russian Federation)

Abstract. Increasing the level of automation of metallurgical units and the development of industrial information systems increases the number of parameters of production and technological processes available for analysis. The consequence is an increase in the complexity and duration of preliminary data preparation for subsequent mathematical and statistical analysis. It is therefore important to develop new and improve existing techniques for the automated process of primary data production. When developing methods of primary data preparation, it should be taken into account that accuracy and adequacy of results of subsequent mathematical analysis are determined by accuracy and adequacy of used initial data. The cross-sectional profile parameters of hot-rolled strips, such as wedge, convexity, thickness variation, displacement, wedge in near-rim zones, local thickenings and thinning of the strip are calculated parameters, i.e. secondary to actual strip thickness measurements over the length and width of hot-rolled strips. As technology is improved in cold rolling shops, the number of grade groups is increasing, for which technological modes of units and processing routes are selected. They are based on actual values of parameters of cross-section profile in order to further reduce the probability of formation of inappropriate products and increased metal consumption. The presented article provides an overview of conventional calculation methods for parameters of cross-section profile of hot-rolled strip and gives an assessment of accuracy and adequacy of application of the parameters averaged along strip length to the whole strip.

Keywords: thin-sheet rolling, strip profile, edge wedge, probability of break, predictive interval

Funding. The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 19-38-90257.

For citation: Bel'skii S.M., Shopin I.I., Shkarin A.N. On adequacy of parameters of strip cross-section profile. Part 1. Predictive interval. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 1, pp. 7–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-7-13>

ВВЕДЕНИЕ

Профиль поперечного сечения горячекатаной полосы определяет технологичность последующей обработки в цехах холодной прокатки [1 – 30]. Если параметры, характеризующие профиль, выходят за допустимые границы, то при холодной прокатке полоса получит неплоскостность в виде волнистости и/или коробоватости, которую нужно будет править различными способами [1 – 5, 8 – 13, 16 – 21, 25 – 26]. Выход параметров профиля поперечного сечения горячекатаной полосы за допустимые пределы оказывает существенное влияние на вероятность обрыва при холодной прокатке [20]. В работах [13, 20, 21] показано, что потеря рулоном устойчивости (образование дефекта «птичка» или «проседание») также определяется профилем сматываемой полосы.

Параметры профиля поперечного сечения являются косвенными характеристиками, рассчитываемыми на основе первичных данных, получаемых с измерителей толщины поперечного сечения полосы. Параметры профиля поперечного сечения прокатываемой полосы

вычисляются для каждого измеряемого сечения, однако всю полосу характеризуют усредненными по длине параметрами. На основе расчетных параметров профиля поперечного сечения для части сортаментных групп делается выбор последующей технологии обработки горячекатаной полосы.

Возникает вопрос, насколько точно усредненные параметры могут характеризовать фактический профиль поперечного сечения в одном конкретном месте, например, в месте обрыва полосы.

КЛИНОВИДНОСТЬ, ВЫПУКЛОСТЬ И РАЗНОТОЛЩИННОСТЬ

К общепринятым параметрам профиля поперечного сечения полос относятся следующие (рис. 1): клиновидность (W), выпуклость (C), разнотолщинность (TV) и смещение выпуклости (D). Эти параметры определяются по значениям аппроксимирующей параболической функции, рассчитанной по фактическим измерениям толщины в одном сечении:

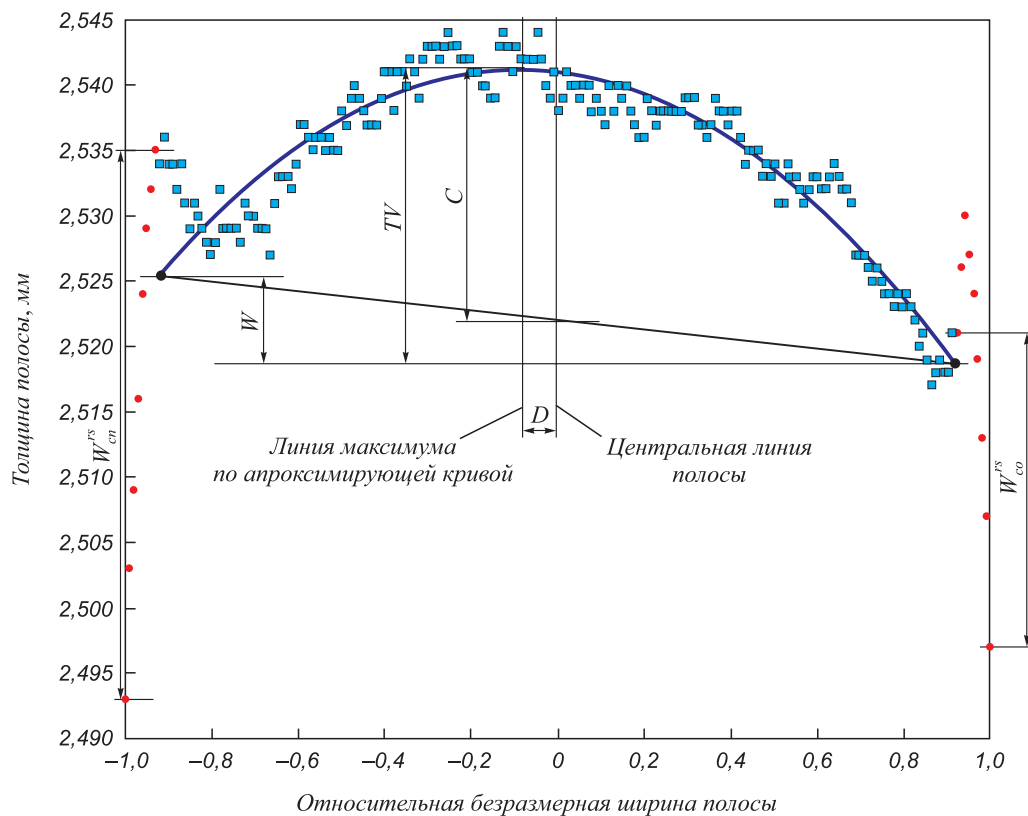


Рис. 1. Визуальное представление параметров профиля поперечного сечения:

● – исключенные точки (40 мм от каждого края, 8 измерений); ■ – измерения, по которым строится аппроксимирующая кривая;
— – аппроксимирующая кривая

Fig. 1. Visual representation of parameters of cross-sectional profile:

● – excluded points (40 mm from each edge, 8 measurements); ■ – measurements used to build the approximating curve;
— – approximating curve

$$\hat{h}(x) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2,$$

где $\hat{h}(x)$ – функция аппроксимированной толщины полосы; x – безразмерная координата ширины полосы, при этом ширина изменяется от $-1,0$ до $+1,0$; β_0 , β_1 и β_2 – коэффициенты, определяемые по методу наименьших квадратов.

При расчете коэффициентов аппроксимирующей функции не учитывают измерения на расстоянии 40 мм от края полосы с необрезной кромкой и на расстоянии 25 мм для полос с подрезкой кромкой.

Клиновидность профиля поперечного сечения определяется как разность толщин на расстоянии 40 мм от противоположных кромок. С учетом этого получаем упрощенную формулу для расчета клиновидности:

$$W = \beta_1 \left(-2 + \frac{160}{B} \right),$$

где B – ширина полосы, мм.

Смещение выпуклости профиля поперечного сечения равно расстоянию от максимального значения толщины до центральной линии полосы:

$$D = -\frac{B\beta_1}{4\beta_2}.$$

Выпуклость профиля поперечного сечения определяется как разность между максимальным значением толщины и средним значением толщин на расстоянии 40 мм от кромок со стороны привода и со стороны оператора:

$$C = -\frac{\beta_1^2}{4\beta_2} - \beta_2 \left(1 - \frac{160}{B} + \frac{6400}{B^2} \right).$$

Поперечная разнотолщинность TV профиля поперечного сечения определяется как разность между максимальным значением толщины и толщиной на расстоянии 40 мм от более тонкой кромки по аппроксимирующей функции:

$$TV = C + \frac{|W|}{2}.$$

Выпуклость профиля поперечного сечения

$$C = \frac{W}{2} \left[\frac{D}{(80-B)} + \frac{(80-B)}{4D} \right].$$

В дальнейшем детальный анализ будем проводить для выпуклости C и клиновидности профиля W поперечного сечения.

Отброшенные измерения в 40-мм прикромочной зоне измерения характеризуются параметрами: прикро-

мочной клиновидностью полосы со стороны оператора W_{co}^{rs} и прикромочной клиновидностью полосы со стороны привода W_{cn}^{rs} , которые определяются как разница фактической толщины в 40 мм от края и на кромке полосы.

КОЭФФИЦИЕНТ ДЕТЕРМИНАЦИИ И ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРВАЛ

Оценкой адекватности аппроксимирующей функции является коэффициент детерминации [20, 21]:

$$R^2 = \frac{\sum_i (\hat{H}_i - \bar{H})^2}{\sum_i (H_i - \bar{H})^2} = 1 - \frac{\sum_i (H_i - \hat{H}_i)^2}{\sum_i (H_i - \bar{H})^2},$$

где R_2 – коэффициент детерминации; \hat{H} – вектор значений высоты поперечного сечения, рассчитанный по параболической аппроксимации; H_i – фактическое значение толщины полосы в сечении; \bar{H} – усредненное значение толщины полосы в сечении.

Однако с практической точки зрения важнее оценивать величину ошибки при прогнозировании толщины полосы [15, 22, 24, 27 – 30]. Для этого будем использовать предсказательный интервал e_{PI} [30] (диапазон $H(x_0) \pm e_{PI}(x_0)$, в котором с заданной вероятностью α находится фактическое значение толщины полосы в конкретной координате по ширине полосы, заданной вектором $x_0 = \{1, x_0, x_0^2\}$):

$$e_{PI}(x_0) = t_{1-\alpha, n-m} \hat{\sigma} \sqrt{1 + x_0^T (X^T X)^{-1} x_0}, \quad (1)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2},$$

где n – количество измерений толщины полосы; m – количество коэффициентов (для случая параболической аппроксимации $m = 3$); $\hat{\sigma}$ – среднеквадратическое отклонение ошибок прогноза толщины полосы H_i ; $t_{1-\alpha, n-m}$ – табличное значение обратного двустороннего t -распределения Стьюдента при вероятности $(1 - \alpha)$ и степени свободы $(n - m)$.

АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА

Рассмотрим с точки зрения вероятностного подхода точность представления профиля поперечного сечения только одним усредненным значением параметра для горячекатаной продукции (марка стали Э3А; толщина 2,5 мм; ширина 1055 мм; выпуклость профиля поперечного сечения 30 мкм; число проанализированных полос 4528).

Оценку точности представления произведем для двух параметров: выпуклости и клиновидности, а точность представления будем оценивать по величине

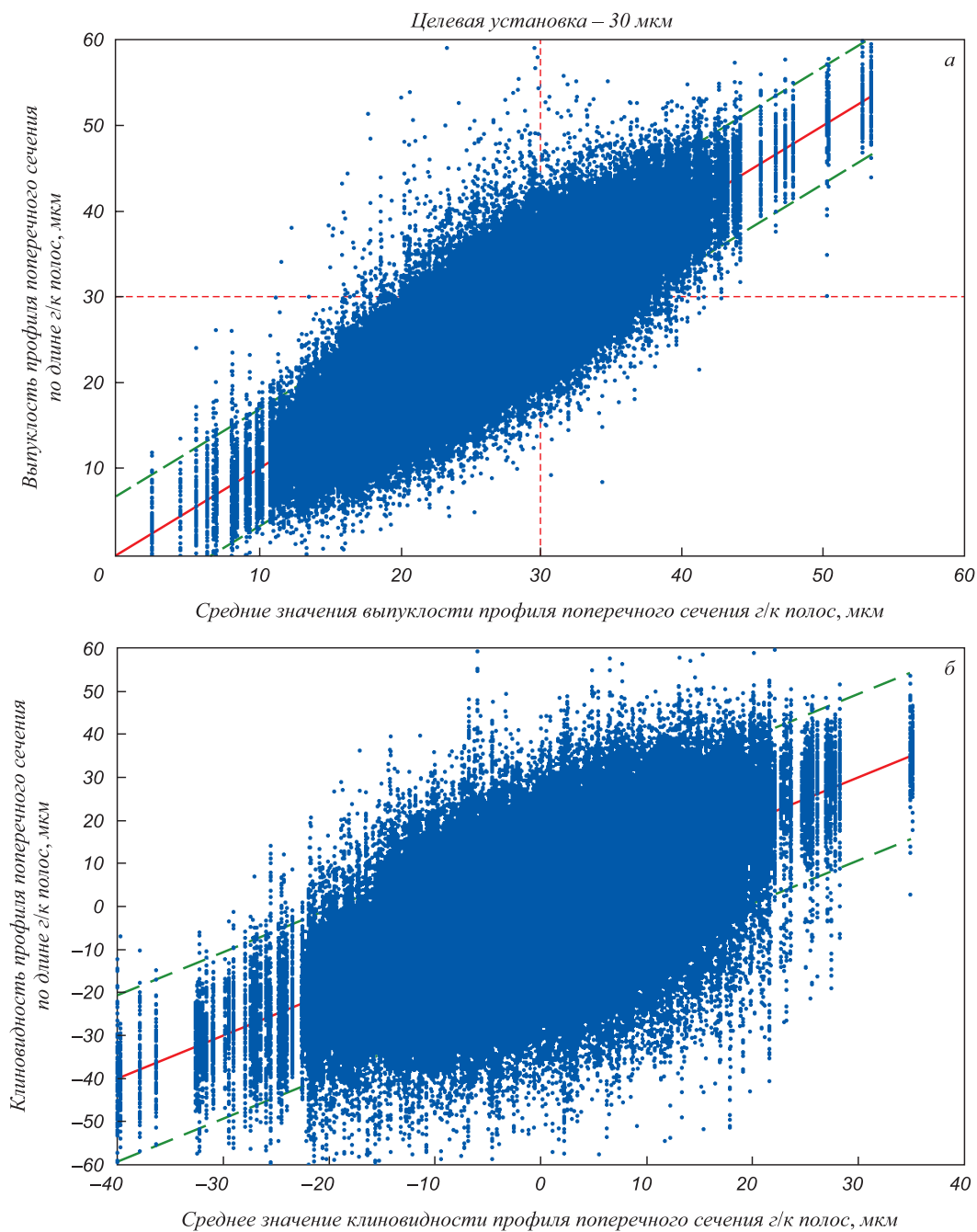


Рис. 2. Соотношение распределенных по длине и средних значений выпуклости (а) и клиновидности (б) профиля поперечного сечения полосы

Fig. 2. Ratio of length-distributed values and average values of convexity (a) and wedging (б) of strip cross-section profile

Результаты оценки предсказательного интервала для средних значений параметров профиля по длине горячекатаных полос

Results of predictive interval estimation for average values of profile parameters along the length of hot-rolled strips

Параметры профиля поперечного сечения	Среднеквадратичное отклонение параметров профиля поперечного сечения, мкм		Предсказательный интервал, мкм				Разница между верхней и нижней границей оптимального диапазона требований, мкм
	по длине полосы	для отклонения от среднего	80 %	90 %	95 %	99 %	
Выпуклость, мкм	6,88	3,48	4,46	5,72	6,82	8,96	10
Клиновидность, мкм	13,7	9,9	12,6	16,2	19,3	25,4	14

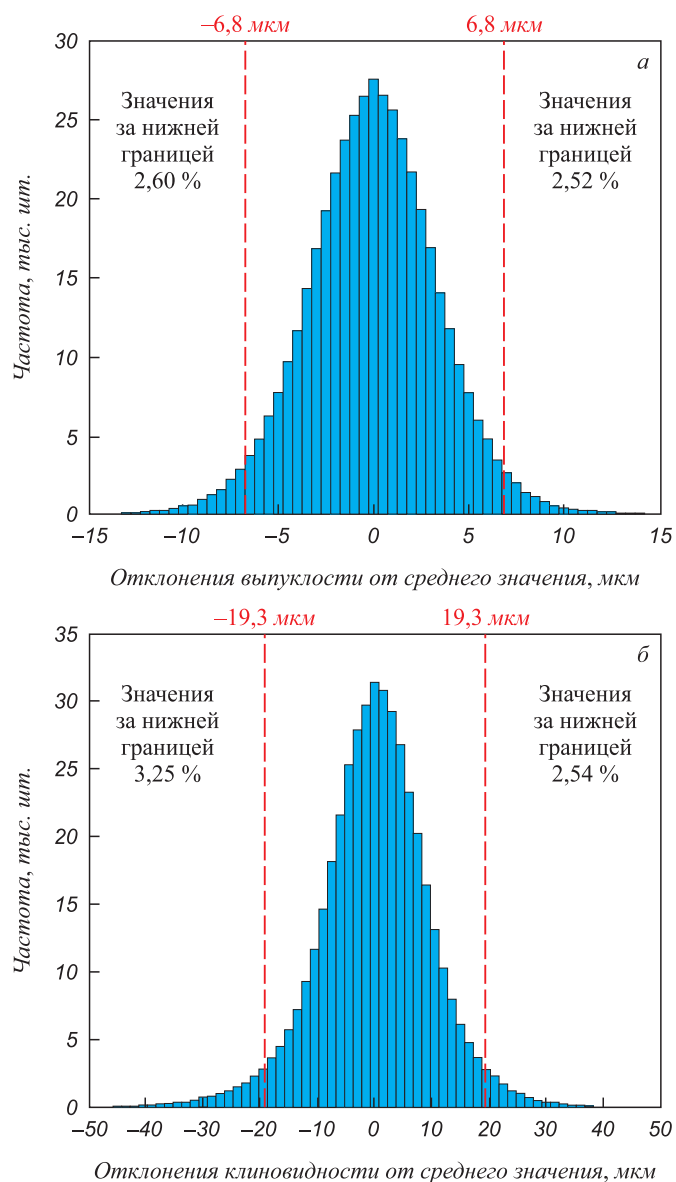


Рис. 3. Гистограмма отклонений выпуклости (а) и клиновидности (б) профиля поперечного сечения полосы от среднего значения

Fig. 3. Histogram of deviations of convexity (a) and wedging (b) of strip cross from average value

предсказательного интервала среднего значения распределенных по длине величин параметров профиля, измеренных с шагом 10 м. С этой целью реализуем следующий алгоритм.

1. Рассчитываем среднее значение параметра профиля поперечного сечения для каждой горячекатаной полосы; откладываем для каждой полосы это значение на оси абсцисс.

2. Для каждой полосы находим вектор абсолютных отклонений параметров профиля по длине относительно среднего значения по формуле (1). На вертикальной линии, проведенной через абсциссу среднего значения

одной полосы, отмечаем все отклонения, соответствующие каждому профилю поперечного сечения, измеренному через каждые 10 м этой полосы (рис. 2). Соответственно рис. 2, а – для выпуклости C , рис. 2, б – для клиновидности W .

3. Строим гистограмму отклонений: каждому абсолютному отклонению параметров профиля от среднего значения для всех анализируемых полос присваиваем число, соответствующее количеству полос, имеющих это отклонение (рис. 3). Соответственно рис. 3, а – для выпуклости C , рис. 3, б – для клиновидности W .

4. Определяем среднеквадратичное отклонение абсолютных ошибок прогноза по формуле (1) для каждой полосы. Далее определяем предсказательный интервал с заданной вероятностью $\alpha = 95\%$ для распределенных по длине полосы параметров профиля поперечного сечения относительно среднего значения по формуле (1) и наносим их на рис. 2, 3.

Результаты расчета предсказательных интервалов для средних значений выпуклости и клиновидности профиля поперечного сечения представлены в таблице. Предсказательный интервал 95 % для выпуклости профиля поперечного сечения равен $\pm 6,8$ мкм, а для клиновидности $\pm 19,3$ мкм (см. рис. 2, 3).

Физический смысл полученных результатов заключается в том, что в пределах рассчитанного предсказательного интервала от среднего значения находится 95 % наблюдений (измерений) параметров профиля поперечного сечения. Из таблицы видно, что диапазоны требований к параметрам профиля поперечного сечения, сформулированных из условия минимизации вероятности обрыва полосы при холодной прокатке, могут быть меньше 95 % предсказательного интервала среднего значения (например, для клиновидности W). Это значит, что, даже попадая средним значением в центр оптимального диапазона, более чем 5 % параметров по длине полосы будут выходить за пределы требований. Усреднение параметров по длине полосы приводит к потере информации о разбросе. В данном случае величина разброса значительна и в прогнозной модели вероятности некоторого события (например, обрыва полосы) лучше использовать все распределенные по длине полосы значения параметров.

Выводы

Выполнен анализ точности использования усредненных значений параметров профиля поперечного сечения горячекатаных полос для оценки параметров, распределенных по длине полос. В результате выявлено, что разброс параметров профиля поперечного сечения по длине горячекатаных полос слишком велик для использования усредненных значений в прогнозных математических моделях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Ginzburg V.B. *Flat-Rolled Steel Processes: Advanced Technologies*. CRC Press, 2009. 384 p.
- Ginzburg V.B. *Metallurgical Design of Flat Rolled Steels*. Marcel Dekker, 2005. 710 p.
- Roberts W.L. *Cold Rolling of Steel*. Marcel Dekker, 1978. 799 p.
- Бельский С.М., Мухин Ю.А. Классификация технологических принципов регулирования плоскостности полос // *Сталь*. 2009. № 11. С. 47–50.
- Бельский С.М., Мухин Ю.А. Горячая прокатка полос с местным утолщением // *Сталь*. 2009. № 5. С. 35–41.
- Сажин Ю.В., Иванова И.А. *Эконометрика*. Саранск: Мордовский госуд. ун-т, 2014. 316 с.
- Ишханян М.В. *Эконометрика*. М.: Российский ун-т транспорта (МИИТ), 2017. 65 с.
- Shinkin V.N. Mathematical model of technological parameters' calculation of flanging press and the formation criterion of corrugation defect of steel sheet's edge // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 2017. No. 1. P. 44–47. <https://doi.org/10.17580/cisr.2017.01.10>
- Shinkin V.N. Arithmetical method of calculation of power parameters of 2N-roller straightening machine under flattening of steel sheet // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 14. P. 22–27. <https://doi.org/10.17580/cisr.2017.02.05>
- Predeleanu M., Gilormini P. *Advanced Methods in Materials Processing Defects*. Vol. 45. Elsevier Science, 1997. 422 p.
- Emmens W.C. *Formability: A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal*. Springer, 2011. 112 p.
- Muhin U., Belskij S., Koynov T. Study of the influence between the strength of antibending of working rolls on the widening during hot rolling of thin sheet metal // *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016. Vol. 10. No. 37. P. 318–324. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.37.42>
- Бельский С.М., Шопин И.И. Параметрическая модель напряженно-деформированного состояния рулона на моталке // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 11. С. 925–931. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-11-925-931>
- Иконникова И.А., Вихорь Н.А. *Эконометрика*. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2012. 87 с.
- Kennedy P. *A Guide to Econometrics*. MIT Press, 2003. 623 p.
- Шинкин В.Н. Расчет кривизны стального листа при правке на восьмироликовой машине // *Черные металлы*. 2017. № 2. С. 46–50.
- Шинкин В.Н. Расчет изгибающих моментов стального листа и реакций опор рабочих роликов при правке на восьмироликовой машине // *Черные металлы*. 2017. № 4. С. 49–53.
- Banabic D. *Multiscale Modeling in Sheet Metal Forming*. Springer, 2016. 405 p.
- Hu P., Ma N., Liu L.-Z., Zhu Y.-G. *Theories, Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming: Analysis, Simulation and Engineering Applications*. Springer, 2013. 210 p.
- Бельский С.М., Шопин И.И. Практическое применение коэффициента седловидности для оценки качества горячекатаной полосы // *Черные металлы*. 2019. № 9. С. 9–13.
- Бельский С.М., Щедрин И.Н., Шопин И.И. Решение проблемы потери устойчивости рулонами из стальной полосы с полимерным покрытием // *Производство проката*. 2018. № 7. С. 5–8.
- Дрейпер Н., Смит Г. *Прикладной регрессионный анализ*. Книга 1. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
- Spokoiny V., Dickhaus T. *Basics of Modern Mathematical Statistics*. Springer, 2015. 296 p.
- Freedman D.A. *Statistical Models: Theory and Practice*. Cambridge University Press, 2009. 442 p.
- Шинкин В.Н. Разрушение стальных труб большого диаметра при дефекте раскатной пригар // *Известия вузов. Черная метал-*
- Ginzburg V.B. *Flat-Rolled Steel Processes: Advanced Technologies*. CRC Press, 2009, 384 p.
- Ginzburg V.B. *Metallurgical Design of Flat Rolled Steels*. Marcel Dekker, 2005, 710 p.
- Roberts W.L. *Cold Rolling of Steel*. Marcel Dekker, 1978, 799 p.
- Bel'skii S.M., Mukhin Yu.A. Classification of regulation principles for strip flatness. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 11, pp. 1012–1015.
- Bel'skii S.M., Mukhin Yu.A. Hot strip rolling with local thickening. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 5, pp. 420–424.
- Sazhin Yu.V., Ivanova I.A. *Econometrics*. Saransk: Mordovian St. Univ., 2014, 316 p. (In Russ.).
- Iskhanyan M.V. *Econometrics*. Moscow: Russ. Transport Univ. (MIIT), 2017, 65 p. (In Russ.).
- Shinkin V.N. Mathematical model of technological parameters' calculation of flanging press and the formation criterion of corrugation defect of steel sheet's edge. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 2017, no. 1, pp. 44–47. <https://doi.org/10.17580/cisr.2017.01.10>
- Shinkin V.N. Arithmetical method of calculation of power parameters of 2N-roller straightening machine under flattening of steel sheet. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 14, pp. 22–27. <https://doi.org/10.17580/cisr.2017.02.05>
- Predeleanu M., Gilormini P. *Advanced Methods in Materials Processing Defects*. Vol. 45. Elsevier Science, 1997, 422 p.
- Emmens W.C. *Formability: A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal*. Springer, 2011, 112 p.
- Muhin U., Belskij S., Koynov T. Study of the influence between the strength of antibending of working rolls on the widening during hot rolling of thin sheet metal. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016, vol. 10, no. 37, pp. 318–324. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.37.42>
- Bel'skii S.M., Shopin I.I. Parametrical model of stress-strain state of the roll on a coiler. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 11, pp. 925–931. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-11-925-931>
- Ikonnikova I.A., Vikhor N.A. *Econometrics*. Tomsk: Tomsk St. Univ. Architect. and Civil Eng., 2012, 87 p. (In Russ.).
- Kennedy P. *A Guide to Econometrics*. MIT Press, 2003, 623 p.
- Shinkin V.N. Calculation of steel sheet's curvature for its flattening in the eight-roller straightening machine. *Chernye Metally*. 2017, no. 2, pp. 46–50. (In Russ.).
- Shinkin V.N. Calculation of bending moments of steel sheet and support reactions under flattening on the eight-roller straightening machine. *Chernye Metally*. 2017, no. 4, pp. 49–53. (In Russ.).
- Banabic D. *Multiscale Modeling in Sheet Metal Forming*. Springer, 2016, 405 p.
- Hu P., Ma N., Liu L.-Z., Zhu Y.-G. *Theories, Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming: Analysis, Simulation and Engineering Applications*. Springer, 2013, 210 p.
- Bel'skiy S.M., Shopin I.I. Application of the saddle coefficient for estimating the quality of a hot-rolled steel strip. *Chernye Metally*. 2019, no. 9, pp. 9–13. (In Russ.).
- Bel'skii S.M., Shchedrin I.N., Shopin I.I. Problem solution of stability loss of coils made of steel strip with polymer coating. *Proizvodstvo prokata*. 2018, no. 7, pp. 5–8. (In Russ.).
- Draper N., Smith H. *Applied Regression Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., 1981, 709 p. (Russ. ed.: Draper N., Smith H. *Prikladnoi regressiionnyi analiz. Kniga 1*. Moscow: Finansy i statistika, 1986, 366 p.)
- Spokoiny V., Dickhaus T. *Basics of Modern Mathematical Statistics*. Springer, 2015, 296 p.
- Freedman D.A. *Statistical Models: Theory and Practice*. Cambridge University Press, 2009, 442 p.
- Shinkin V.N. Destruction of large-diameter steel pipes at rolled burnt-on defect. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 6,

- лургия. 2017. Т. 60. № 6. С. 436–442. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-6-436-442>
26. Шинкин В.Н. Упрощенный метод расчета изгибающих моментов стального листа и реакций рабочих роликов в многороликовой правильной машине // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 10. С. 777–784. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-777-784>.
27. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction. Springer, 2009. 745 p.
28. Venables W.N., Ripley B.D. Modern Applied Statistic with S. Springer, 2002. 498 p.
29. Maindonald J., Braun W. J. Data Analysis and Graphics using R: An Example based Approach. Cambridge University Press, 2010. 552 p.
30. Graybill F.A., Iyer H.K. Regression Analysis: Concepts and Applications. Duxbury Press, 1994. 701 p.
- pp. 436–442. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-6-436-442>
26. Shinkin V.N. Simplified method for calculation of bending moments of steel sheet and reactions of working rollers in multiroll straightening machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 777–784. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-777-784>
27. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction*. Springer, 2009, 745 p.
28. Venables W.N., Ripley B.D. *Modern Applied Statistic with S*. Springer, 2002, 498 p.
29. Maindonald J., Braun W.J. *Data Analysis and Graphics using R: An Example based Approach*. Cambridge University Press, 2010, 552 p.
30. Graybill F.A., Iyer H.K. *Regression Analysis: Concepts and Applications*. Duxbury Press, 1994, 701 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Михайлович Бельский, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением», Липецкий государственный технический университет
E-mail: Belsky-55@yandex.ru

Иван Иванович Шопин, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Липецкий государственный технический университет

Александр Николаевич Шкарин, аспирант кафедры «Обработка металлов давлением», Липецкий государственный технический университет

Sergei M. Bel'skii, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Metal Forming", Lipetsk State Technical University
E-mail: Belsky-55@yandex.ru

Ivan I. Shopin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metal Forming", Lipetsk State Technical University

Aleksandr N. Shkarin, Postgraduate of the Chair "Metal Forming", Lipetsk State Technical University

Поступила в редакцию 19.03.2020
После доработки 16.05.2020
Принята к публикации 25.12.2020

Received 19.03.2020
Revised 16.05.2020
Accepted 25.12.2020