



Оригинальная статья

УДК 621.771.068

DOI 10.17073/0368-0797-2021-3-171-177



ОБ АДЕКВАТНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПОЛОСЫ. СООБЩЕНИЕ 2. ЛОКАЛЬНЫЕ УТОЛЩЕНИЯ И УТОНЕНИЯ

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

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

Аннотация. В настоящее время профиль поперечного сечения прокатываемой полосы принято характеризовать такими геометрическими параметрами, как клиновидность, выпуклость, разнотолщинность, смещение выпуклости, прикормочная клиновидность, при этом некоторые являются избыточными. Методики расчета величин этих параметров известны и общеприняты. Однако существуют такие особенности профиля поперечного сечения прокатываемых полос, как локальные или местные утолщения/утонения, методики расчета величин которых не являются общепринятыми. Практически каждая научная школа прокатчиков или специалисты прокатных производств пользуются собственными методиками, которые зачастую дают неодинаковые результаты для одинаковых профилей поперечного сечения. Проблема идентификации и вычисления параметров локальных утолщений/утонений профиля поперечного сечения прокатываемых полос заключается в определении так называемого «нулевого уровня», превышение/занижение которого является признаком локального утолщения/утонения. В представленной работе продолжены анализ точности и адекватности расчета параметров профиля поперечного сечения прокатываемых полос применительно к локальным утолщениям/утонениям, а также новая методика, основанная на статистических методах. Целевой функцией, которой должно соответствовать распределение толщины по ширине прокатываемой полосы, является симметричная квадратичная парабола. Однако фактическое распределение всегда отличается от целевого в силу ряда причин, к которым относится, в частности, кольцевой износ рабочих валков. На первом шаге в предлагаемой методике с помощью процедуры Уолтера-Шухарта (контрольные карты Шухарта) отсеиваются как выбросы значения толщины полосы, резко отличающиеся от целевого распределения. Однако поскольку без исключения нелинейной (параболической) составляющей измеренного профиля поперечного сечения применять эту процедуру нельзя, она применяется к первой производной функции распределения толщины профиля поперечного сечения. Для определения «нулевого уровня», после вычисления верхней и нижней границ допустимых значений первой производной, отсеиваются все значения толщины, связанные с этими выбросами. Результатом итерационного процесса является «нулевой уровень», относительно которого вычисляются параметры локальных утолщений/утонений.

Ключевые слова: тонколистовая прокатка, профиль поперечного сечения полосы, локальное утолщение, процедура Уолтера-Шухарта, 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 2. Локальные утолщения и утонения // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 171–177. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-171-177>

Original article

ON ADEQUACY OF PARAMETERS OF STRIP CROSS-SECTION PROFILE. PART 2. LOCAL THICKENINGS AND THINNINGS

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

Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya Str., Lipetsk 398600, Russian Federation)

Abstract. At present, the cross-section profile of the rolled strip is characterized by geometrical parameters such as wedge, convex, difference of thickness, displacement of convex, and edge wedge. Some of these parameters are redundant. Techniques for calculating the values of these parameters are known and generally accepted. However, there are features of the cross-section profile of rolled strips, such as local thickenings/thinnings, the methods of calculating values of which are not common: practically every scientific school of rolling scientists or specialists of rolling production use their own techniques, which often produce different results for the same cross-section profiles. The problem of identifying and calculating the local thickenings/thinnings parameters of the rolled strips cross-section profile is to define a so-called “zero level”, the excess/understatement of which is a sign of local thickenings/thinnings. The paper continues to analyze the accuracy and adequacy of the calculation of the cross-section profile parameters of rolled strips for local thickenings/thinnings. A new method based on statistical methods is proposed. The target function that the thickness distribution across the width of the rolled strip must correspond to is a symmetrical quadratic parabola. However, the actual distribution is always different from the target one for a number of reasons, such as ring wear of the work rolls. In the first step, in the proposed technique, the Walter-Shuhart procedure (control

cards) eliminates as emissions of strip thickness values that are dramatically different from the target distribution. But since without excluding the nonlinear (parabolic) component of the measured cross-section profile this procedure cannot be applied, it applies to the first derivative of the cross-section profile thickness distribution function. To determine the “zero level,” after calculating the upper and lower limits of the allowed values of the first derivative, all thicknesses associated with these emissions were eliminated. The result of the repetitive process is a “zero level” according to which the local thickening/thinning parameters are calculated.

Keywords: thin sheet rolling, strip’s cross-section profile, local thickening, Walter–Shuhart procedure, predictive interval

Funding: The work was supported by the RFBR, 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 2. Local thickenings and thinnings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 171–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-171-177>

ВВЕДЕНИЕ

Холоднокатанные полосы могут последовательно прокатываться из горячекатаных на нескольких прокатных станах. Каждая прокатка называется переделом, полосу перед прокаткой называют подкатом, а после прокатки – полосой. Дефекты профиля поперечного сечения подката оказывают существенное влияние на плоскостность полосы, а в отдельных случаях могут приводить к обрывам в линии стана [1 – 5]. Для предупреждения появления дефектов полос в процессе прокатки и их устранения после прокатки применяют различные способы, включая элементы асимметричной прокатки и правку в многороликовых машинах [6 – 23].

Наиболее критичным для последующих переделов дефектом горячекатаных стальных полос являются локальные или местные утолщения. Этот дефект невозможно устранить и весьма затруднительно компенсировать при дальнейшей холодной прокатке:

– если локальное утолщение находится в средней части подката, то оно может выкатываться в дефект плоскостности «местная коробоватость», которую часто называют «желоб»;

– если же утолщение прикромочное, то оно может выкатываться в мелкую краевую волнистость, которую прокатчики иногда называют «рюшка».

Проявление дефектов плоскостности при прокатке горячекатаных полос с локальными утолщениями зависит от высоты и ширины этих утолщений, которые не должны превышать предельных величин, установленных в технологических инструкциях и/или регламентах.

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЛОКАЛЬНЫХ УТОЛЩЕНИЙ ЛИСТА

В настоящее время методики расчета геометрических параметров локальных утолщений не являются общепринятыми. Практически каждая научная школа прокатчиков или специалисты прокатных производств пользуются собственными методиками, которые зачастую дают неодинаковые результаты для одинаковых профилей поперечного сечения. Рассмотрим некоторые известные методики расчета геометрических параметров локальных утолщений горячекатаных полос.

Одна из методик [24] определяет локальное утолщение $\Delta h_{\text{лу}}$ как максимальное превышение толщины в какой-либо точке сечения по ширине полосы $h_{x_{\text{max}}}$ от толщин соседних участков h_x , измеренных на расстоянии 50 мм от этой точки: $\Delta h_{\text{лу}} = h_{x_{\text{max}}} - h_x$.

Очевидным недостатком такого подхода является использование некоего фиксированного расстояния (50 мм), что может привести к значительным искажениям определения абсолютной величины локального утолщения.

Другим способом определения локальных утолщений является измерение превышения фактической толщины полосы над уровнем, определяемым различными функциями, аппроксимирующими профиль поперечного сечения [25 – 27]. Этот способ позволяет локализовать выявленные утолщения и определять их ширину. Однако существует фундаментальный недостаток такого подхода, заключающийся в том, что метод наименьших квадратов, с помощью которого определяются аппроксимационные функции, чувствителен к большим выбросам и шумам измерительной системы, и под их влиянием параболическая аппроксимация может существенно изменяться. Кроме того, этот эффект увеличивает вероятность ошибок первого и второго рода – определять локальные утолщения там, где они фактически отсутствуют, и не выявлять локальные утолщения там, где они фактически есть.

Еще один способ выявления локальных утолщений реализуется путем анализа расположения максимумов и минимумов сглаженной кривой профиля поперечного сечения [28]. Преимущество этого способа заключается в том, что расположение, высота и ширина локального утолщения определяются без использования метода наименьших квадратов, т. е. способ не чувствителен к выбросам и шумам измерительной системы. Однако в данном случае изначально предполагается, что профиль поперечного сечения не имеет локальных утонений, и в качестве «нулевого уровня» отсчета высоты и ширины локальных утолщений определяются локальные минимумы. В то же время из практики известно, что локальные утонения характерны для кромок полосы. Также локальные утонения могут проявляться в условиях значительного локального разогрева рабочих валков, например, вследствие неисправности системы охлаждения. В таких условиях этот способ

выявления локальных утолщений может завышать их абсолютную ширину и высоту.

Предлагаемая методика позволяет определить «нулевой уровень» профиля поперечного сечения прокатываемой полосы, относительно которого будут вычисляться параметры локальных утолщений/утощений, и включает три этапа. Первый этап – отсев грубых отклонений в измерениях профиля поперечного сечения без использования методов аппроксимации. Второй этап – итерационный отсев отклонений в измерениях профиля поперечного сечения с использованием аппроксимации и предсказательного интервала. Третий этап – идентификация локальных утолщений/утощений профиля поперечного сечения.

КОНТРОЛЬНЫЕ КАРТЫ ШУХАРТА

Для первого этапа наилучшим образом подходит статистическая процедура «Контрольные карты Шу-

харта» [29], однако без исключения параболической составляющей в измерениях толщины профиля поперечного сечения применять эту процедуру нельзя. Параболическая составляющая измерений профиля поперечного сечения убирается методом численного дифференцирования.

Для этого сначала с помощью теоремы центрального предела [30] сглаживаем эпюру профиля поперечного сечения, применив метод скользящего среднего. Достаточная гладкость зависимости достигается при размере окна скольжения, равном 8. Пример сглаживания фактических измерений толщины методом скользящего среднего представлен на рис. 1. Затем численным дифференцированием находим функцию первой производной сглаженной функции (рис. 2).

Далее, после исключения линейной составляющей и в соответствии с процедурой Волтера-Шухарта [31, 32], вычисляем краткосрочное среднеквадратическое отклонение, нижнюю и верхнюю границы:

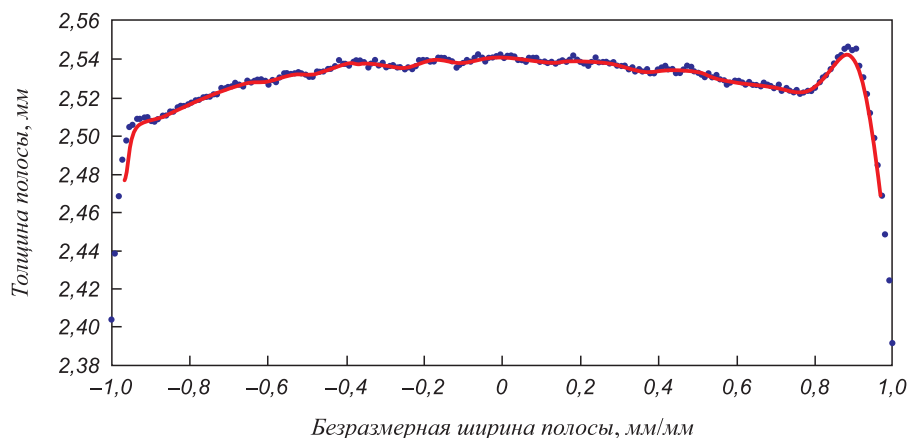


Рис. 1. Исходные измерения толщины полосы и сглаживание методом скользящего среднего:
 ● – первичные измерения толщины полосы; — — сглаженная толщина

Fig. 1. Initial measurements of strip thickness and smoothing by moving-average method:
 ● – primary measurements of the strip thickness; — — smoothed thickness

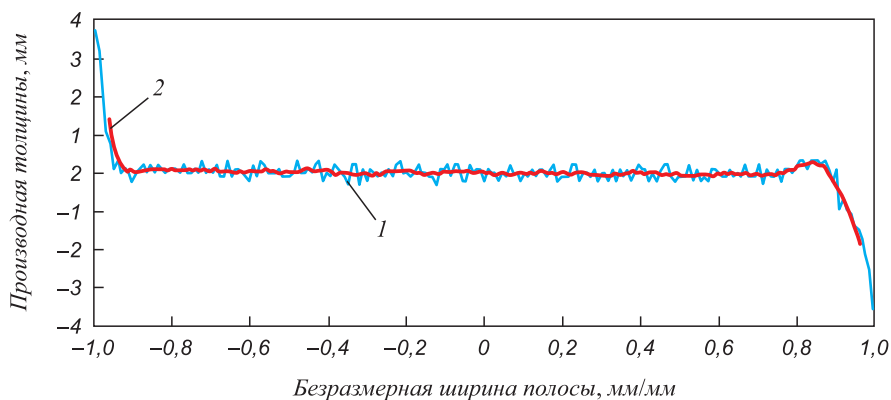


Рис. 2. Производная первого порядка сглаженной функции:
 1 – производная первого порядка по исходным данным; 2 – производная первого порядка по сглаженным данным

Fig. 2. First-order derivative of a smoothed function:
 1 – derivative of the first order according to the initial data; 2 – derivative of the first order according to the smoothed data

$$\sigma_{mr} = \frac{MR}{d_4(w)}, LCL = H - 3\sigma_{mr}, UCL = H + 3\sigma_{mr};$$

$$MR = \text{медиана} [MR_1, \dots, MR_{n-1}], MR_i = |y_{i+1} - y_i|,$$

где MR – скользящий размах; MR_i – размах между двумя соседними значениями производных y_{i+1} и y_i ; w – длина скользящего размаха, в общем случае равная 2; $d_4(w)$ – табличный коэффициент, определяемый из свойств распределения Стьюдента (для $w = 2$ принимает значение 0,954); H – медианное значение толщины в профиле; LCL и UCL – нижняя и верхняя границы.

Контрольная карта для первой производной представлена на рис. 3.

Отсеиваем значения производной, не попавшие в вычисленный интервал, и связанные с ними значения

толщины профиля поперечного сечения полосы. Таким образом, отфильтрованные толщины профиля являются результатом первого этапа.

ИТЕРАЦИОННЫЙ ОТСЕВ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ УТОЛЩЕНИЙ

Второй этап заключается в итерационном поиске «нулевого уровня». Методом наименьших квадратов находим параболическую аппроксимацию отфильтрованных значений толщины и вычисляем 95 %-ный предсказательный интервал. Отсеиваем все значения толщин, не попавшие в предсказательный интервал. Процедуру аппроксимации и отсеивания повторяем до тех пор, пока все оставшиеся значения толщины не окажутся внутри предсказательного интервала. Последняя

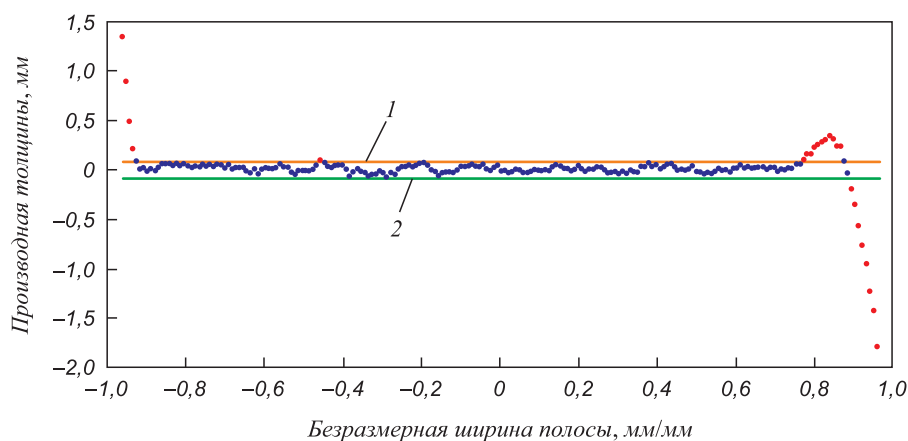


Рис. 3. Контрольная карта для первой производной:

1 – верхняя граница (UCL); 2 – нижняя граница (LCL); ● – значения производной, не попавшие в вычисленный интервал LCL

Fig. 3. Control chart for first-order derivative:

1 – upper boundary (UCL); 2 – lower boundary (LCL); ● – derivative values outside the calculated interval

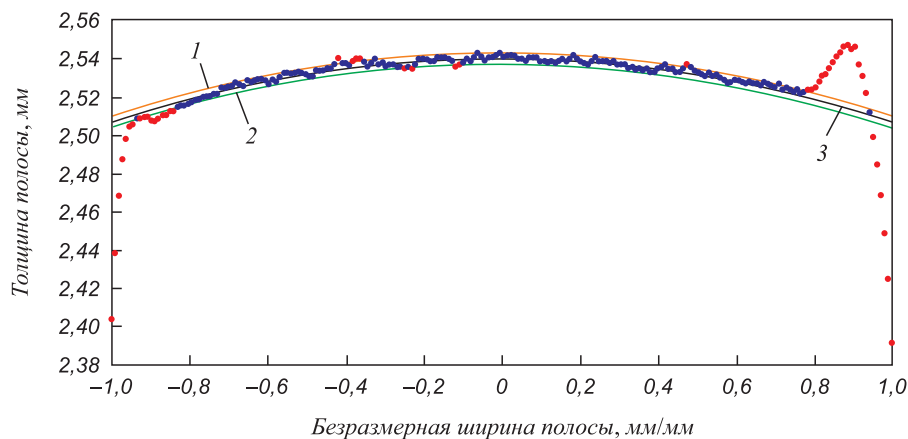


Рис. 4. «Нулевой уровень» и границы предсказательного интервала:

1 – верхняя граница предсказательного интервала; 2 – нижняя граница предсказательного интервала; 3 – параболическая аппроксимация; ● – локальные утолщения или утонения

Fig. 4. “Zero level” and the predictive interval boundaries:

1 – upper boundary of the predictive interval; 2 – lower boundary of the predictive interval; 3 – parabolic approximation; ● – local thickenings or thinning

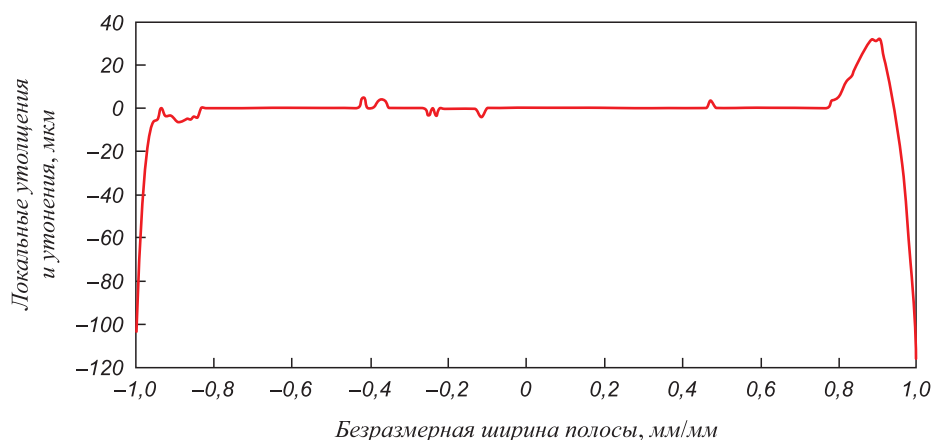


Рис. 5. Идентификация локальных утолщений и утонений профиля поперечного сечения

Fig. 5. Identification of local thickenings and thinnings of the cross-section profile

параболическая аппроксимация и есть искомым «нулевой уровень».

Третий этап – идентификация локальных утолщений и утонений профиля поперечного сечения полосы. Локальными утолщениями будем считать участки профиля поперечного сечения, толщина которых превышает верхнюю границу предсказательного интервала. Соответственно, локальные утонения – участки профиля поперечного сечения, толщина которых меньше нижней границы предсказательного интервала.

На рис. 4 показан «нулевой уровень» с границами участков локальных утолщений и утонений.

На рис. 5 показана диаграмма положения и размеров локальных утолщений и утонений. Если изме-

рение толщины находится внутри предсказательного интервала, то оно имеет «нулевой уровень» утолщений и утонений. Над и под «нулевым уровнем» изображены контуры и размеры локальных утолщений и утонений.

Выводы

Разработана методика выявления локальных утолщений/утонений профиля поперечного сечения полосы с использованием процедуры Уолтера-Шухарта (контрольные карты). Методика позволяет определять положение и размеры локальных утолщений/утонений профиля поперечного сечения полос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Ginzburg V.B. *Flat-Rolled Steel Processes: Advanced Technologies*. CRC Press, 2009. 384 p.
2. Ginzburg V.B. *Metallurgical Design of Flat Rolled Steels*. Marcel Dekker, 2005. 710 p.
3. Roberts W.L. *Cold Rolling of Steel*. Marcel Dekker, 1978. 544 p.
4. Бельский С.М., Коцарь С.Л., Поляков Б.А. Расчет распределения усилия прокатки по ширине полосы и остаточных напряжений в полосе вариационным методом // Известия вузов. Черная металлургия. 1990. № 10. С. 32–34.
5. Бельский С.М., Шопин И.И. Математическая модель вероятности обрыва полосы при холодной прокатке // Черные металлы. 2020. № 3. С. 18–23.
6. Muhin U., Belskij S., Makarov E., Koynov T. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table // *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016. Vol. 10. No. 37. P. 305–311. <http://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.37.40>
7. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Message 1. Curvature of sheet // *CIS Iron and Steel Review*. 2016. Vol. 12. P. 37–40. <http://doi.org/10.17580/cisirs.2016.02.08>
8. Hingole R.S. *Advances in Metal Forming: Expert System for Metal Forming*. Springer, 2015. 116 p.
9. Lim Y., Venugopal R., Ulsoy A.G. *Process Control for Sheet-Metal Stamping Process Modeling, Controller Design and Stop-Floor Implementation*. Springer, 2014. 140 p.
10. Predeleanu M., Gilormini P. *Advanced Methods in Materials Processing Defects*. Vol. 45. Elsevier Science, 1997. 422 p.
1. Ginzburg V.B. *Flat-Rolled Steel Processes: Advanced Technologies*. CRC Press, 2009. 384 p.
2. Ginzburg V.B. *Metallurgical Design of Flat Rolled Steels*. Marcel Dekker, 2005. 710 p.
3. Roberts W.L. *Cold Rolling of Steel*. Marcel Dekker, 1978. 544 p.
4. Bel'skii S.M., Kotsar' S.L., Polyakov B.A. Calculation of rolling force distribution along the strip width and residual stresses in a strip by variational method. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1990, no. 10, pp. 32–34. (In Russ.).
5. Bel'skii S.M., Shopin I.I. Predictive mathematical model of strip breakage during cold rolling. *Chernye metall*. 2020, no. 3, pp. 18–23. (In Russ.).
6. Muhin U., Belskij S., Makarov E., Koynov T. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016, vol. 10, no. 37, pp. 305–311. <http://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.37.40>
7. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Message 1. Curvature of sheet. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 37–40. <http://doi.org/10.17580/cisirs.2016.02.08>
8. Hingole R.S. *Advances in Metal Forming: Expert System for Metal Forming*. Springer, 2015. 116 p.
9. Lim Y., Venugopal R., Ulsoy A.G. *Process Control for Sheet-Metal Stamping Process Modeling, Controller Design and Stop-Floor Implementation*. Springer, 2014. 140 p.
10. Predeleanu M., Gilormini P. *Advanced Methods in Materials Processing Defects*. Vol. 45. Elsevier Science, 1997. 422 p.

11. Wilko C.E. *Formability: A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal*. Springer, 2011. 112 p.
12. 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. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-777-784>
13. Banabic D. *Multiscale Modeling in Sheet Metal Forming*. Springer, 2016. 405 p.
14. Spokoyny V., Dickhaus T. *Basics of Modern Mathematical Statistics*. Springer, 2015. 296 p.
15. 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. 224 p.
16. Lenard J.G. *Metal Forming Science and Practice*. Elsevier Science, 2002. 378 p.
17. Шинкин В.Н. Методика расчета геометрии стального листа при предварительной правке на семироликовой правильной машине // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 11. С. 793–798. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-11-793-798>
18. Шинкин В.Н. Расчет сил и моментов семироликовой правильной машины при предварительной правке стального листа // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 12. С. 870–874. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-12-870-874>
19. Shatalov R., Maksimov E., Koinov T., Babkin A. Research of flatness defects forming at 20-hi steel strips rolling mill // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017. Vol. 52. No. 2. P. 199–204.
20. Shatalov R., Aldunin A. The development of mathematical models to improve the technology and the quality of copper alloys sheets // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016. Vol. 51. No. 2. P. 242–244.
21. Shatalov R., Genkin A. Sheet mill control in steel strip hot rolling // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2015. Vol. 50. No. 6. P. 624–628.
22. Frank V. *Lecture Notes in Production Engineering*. Springer, 2013. 211 p.
23. 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. <http://doi.org/10.17580/cisirs.2017.02.05>
24. Хлопотин М.В. Исследование теплового режима валков широкополосных станов горячей прокатки и его влияния на поперечный профиль горячекатаных полос: Дис. ... канд. техн. наук. Череповец, 2010. 142 с.
25. Кузнецова Е.В., Шкарин А.Н. Применение аппроксимационных методов для моделирования поверхности поперечного профиля горячего проката // *Современные научно-практические решения XXI века*. Воронеж, 2016. С. 243–248.
26. Пименов В.А., Бельский С.М., Шкарин А.Н. Повышение точности аппроксимации контура профиля поперечного сечения горячекатаного подката // *Вестник Липецкого государственного технического университета*. 2019. № 1 (39). С. 70–73.
27. Пименов В.А., Кузнецова Е.В., Шкарин А.Н. Структурная идентификация модели поперечного профиля горячего проката // *Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика*. 2016. Т. 4. № 6 (26). С. 88–92.
28. Levykina A.G., Shkatov V.V., Mazur I.P. Hot rolling strips at the casting and rolling unit during coil-to-coil and endless rolling modes // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 37. P. 472–477. <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.12.076>
29. ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011 Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы.
30. Rouaud M. *Probability, statistics and estimation: Propagation of uncertainties in experimental measurement*. 2013. Available at URL: <https://www.incertitudes.fr/book.pdf>.
11. Wilko C.E. *Formability: A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal*. Springer, 2011. 112 p.
12. Shinkin V.N. Simplified method for calculation on bending moments of steel sheet and reactions on working rollers in multiroll straightening machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 777–784. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-777-784>
13. Banabic D. *Multiscale Modeling in Sheet Metal Forming*. Springer, 2016. 405 p.
14. Spokoyny V., Dickhaus T. *Basics of Modern Mathematical Statistics*. Springer, 2015. 296 p.
15. 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. 224 p.
16. Lenard J.G. *Metal Forming Science and Practice*. Elsevier Science, 2002. 378 p.
17. Shinkin V.N. Calculation method of steel sheet's geometry under preliminary flattening on seven-roller straightening machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 11, pp. 793–798. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-11-793-798>
18. Shinkin V.N. Calculation of steel sheet's curvature under preliminary flattening on the seven-roller straightening machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 12, pp. 870–874. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-12-870-874>
19. Shatalov R., Maksimov E., Koinov T., Babkin A. Research of flatness defects forming at 20-hi steel strips rolling mill. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017, vol. 52, no. 2, pp. 199–204.
20. Shatalov R., Aldunin A. The development of mathematical models to improve the technology and the quality of copper alloys sheets. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016, vol. 51, no. 2, pp. 242–244.
21. Shatalov R., Genkin A. Sheet mill control in steel strip hot rolling. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2015, vol. 50, no. 6, pp. 624–628.
22. Frank V. *Lecture Notes in Production Engineering*. Springer, 2013. 211 p.
23. 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. <http://doi.org/10.17580/cisirs.2017.02.05>
24. Khlopotin M.V. *Investigation of the thermal regime of rolls of wide-strip hot-rolling mills and its effect on the transverse profile of hot-rolled strips: Cand. Tech. Sci. Diss.* Cherepovets, 2010. 142 p. (In Russ.).
25. Kuznetsova E.V., Shkarin A.N. Use of approximation methods for modeling the surface of hot rolled transverse profile. In: *Modern Scientific and Practical Solutions of the XXI century*. Voronezh, 2016. pp. 243–248. (In Russ.).
26. Pimenov V.A., Bel'skii S.M., Shkarin A.N. Increasing the approximation accuracy of cross-section profile shape of hot semi-finished rolled stock. *Vestnik Lipetskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2019, no. 1 (39), pp. 70–73. (In Russ.).
27. Pimenov V.A., Kuznetsova E.V., Shkarin A.N. Structural identification of the model of hot rolled transverse profile. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: Teoriya i praktika*. 2016, vol. 4, no. 6 (26), pp. 88–92. (In Russ.).
28. Levykina A.G., Shkatov V.V., Mazur I.P. Hot rolling strips at the casting and rolling unit during coil-to-coil and endless rolling modes. *Procedia Manufacturing*. 2019, vol. 37, pp. 472–477. <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.12.076>
29. GOST R ISO 7870-1-2011 *Statistical methods. Control charts. Part 1. General guidelines*. (In Russ.).
30. Rouaud M. *Probability, Statistics and Estimation: Propagation of Uncertainties in Experimental Measurement*. 2013. Available at URL: <https://www.incertitudes.fr/book.pdf>.

31. ГОСТ Р 50779.42-99 Статистические методы. Контрольные карты Шухарта.
32. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning: Data mining, inference and prediction. Springer, 2009. 745 p.
31. GOST 50779.42-99 Statistical methods. Shewhart control charts. (In Russ.).
32. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction. Springer, 2009, 745 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 05.07.2020 г.
После доработки 11.08.2020 г.
Принята к публикации 01.03.2021 г.

Received 05.07.2020
Revised 11.08.2020
Accepted 01.03.2021