



УДК 621.771

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-417-423



Оригинальная статья

Original article

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЛОСКОСТНОСТИ СТАЛЬНЫХ ХОЛДНОКАТАНЫХ ПОЛОС

Д. Л. Шалаевский

Череповецкий государственный университет (Россия, 162600, Вологодская обл., Череповец, пр. Луначарского, 5)

shal-dmitrij@yandex.ru

Аннотация. Известной причиной возникновения дефектов плоской формы на готовых стальных холоднокатаных полосах является неравенство коэффициентов вытяжки по ширине полосы. На разницу значений этих коэффициентов оказывают влияние параметры профилировок бочек валков, энергосиловые параметры прокатки, параметры работы системы автоматического регулирования профиля и формы полосы. Воздействие всех технологических факторов на форму полосы будет иметь сложный характер. В работе рассмотрен подход, учитывающий основные параметры работы прокатного оборудования и позволяющий оценить вид и амплитуду дефектов плоскостности готовых стальных полос. При реализации такого подхода выполнены шесть этапов расчета: энергосиловой расчет процесса холодной прокатки; расчет упругих деформаций поверхности бочки рабочего валка; оценка износа поверхности бочки рабочего валка; расчет теплового профиля валка; оценка выпуклости поперечного профиля стальной полосы; оценка показателей планшетности готовой полосы. Для вычисления параметров, влияющих на планшетность проката, использованы известные методики расчета, адаптированные под конкретные технологические условия. Результаты оценки показателей формы катаной полосы, полученные с помощью модели, сопоставлены с результатами моделирования в программе Deform 3D. Результаты моделирования продемонстрировали достоверность предложенного подхода оценки качества проката.

Ключевые слова: плоскостность холоднокатаных стальных полос, непрерывная прокатка, режим прокатки, дефекты формы, профилировка бочки валка, упругая деформация бочки валка, тепловой профиль бочки валка, амплитуда дефекта

Для цитирования: Шалаевский Д.Л. Методика расчета плоскостности стальных холоднокатаных полос. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(4):417–423. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-417-423>

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE FLATNESS OF COLD-ROLLED STEEL STRIPS

D. L. Shalaevskii

Cherepovets State University (5 Lunacharskogo Ave., Cherepovets, Vologda Region 162600, Russian Federation)

shal-dmitrij@yandex.ru

Abstract. A known cause of flat shape defects in finished cold-rolled steel strips is the inequality of the drawing ratios across the strip width. Difference in the values of these ratios is affected by the roll barrel profiling parameters, energy-power parameters of rolling, operating parameters of the automatic profile and strip shape control system. The impact of all technological factors on the strip shape is complex. The paper considers an approach that takes into account the main operating parameters of rolling equipment allowing to estimate the type and amplitude of flatness defects in finished steel strips. When implementing this approach, 6 calculation stages were performed: energy-power calculation of the cold rolling process; calculation of elastic deformations of the working roll barrel surface; assessment of wear of the working roll barrel surface; calculation of the roll thermal profile; assessment of convexity of the steel strip transverse profile; assessment of flatness indicators of the finished strip. To calculate the parameters affecting the flatness of the rolled product, known calculation methods adapted to specific process conditions were used. The results of assessing the shape indicators of the rolled strip obtained using the model were compared with the results of modeling in the Deform 3D program. The modeling results demonstrated reliability of the proposed approach to assessing the rolled product quality.

Keywords: flatness of cold-rolled steel strips, continuous rolling, rolling mode, shape defects, roll barrel profiling, elastic deformation of roll barrel, thermal profile of roll barrel, defect amplitude

For citation: Shalaevskii D.L. Methodology for calculating the flatness of cold-rolled steel strips. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2025;68(4):417–423. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-417-423>

ВВЕДЕНИЕ

Основные причины потери стальной катаной полосой плоской формы – неравномерная ее деформация по ширине, а также малая жесткость ее сечения. Последний фактор неплоскостности относится к характеристикам плоского проката.

Подавляющее количество авторов известных трудов в качестве основного критерия потери плоской формы использует разность коэффициентов вытяжки по ширине полосы. При этом отдельные влияющие параметры считаются более значимыми, другие – менее значимыми [1 – 18].

В работах [2 – 4] приведены критерии прокатки плоской полосы на основе только лишь значений коэффициентов вытяжки по ширине полосы. Результаты исследований, представленные в публикациях [5 – 8], демонстрируют возможность оценки дефекта плоскостности полосы по характеристикам ее сечения.

Модели, основанные на учете комплекса технологических параметров при оценке планшетности полосы, приведены в трудах [9 – 11].

В работах [12 – 14] представлены подходы, при реализации которых идентификация дефектов плоской формы осуществляется по характеристикам поперечного профиля проката.

Модели, ставящие в основу причин потери плоскостности полосы технологию ее охлаждения после прокатки, приведены в трудах [15 – 18].

Методика оценки планшетности, упомянутая в работе [9], позволяет выполнять расчет амплитуды неплоскостности по параметрам процесса прокатки. Эта методика учитывает практически все влияющие факторы, например, такие, как профилировка бочки рабочих валков, ее возможный износ, перекося осей рабочих валков и ряд других значимых факторов.

В рамках исследования ставилась задача разработки методики оценки амплитуды волнистости и коробоватости холоднокатаной полосы на основе разности коэффициентов вытяжки по ширине, ее дальнейшая апробация путем сравнения результатов расчета и моделирования в программе Deform 3D.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет амплитуды «волны» или «короба», исходя из разности коэффициентов вытяжки полосы по ее ширине, требует данных об упругих деформациях рабочих и опорных валков, износе поверхности их бочек, а также сведения о неравномерности их тепловых расширений на ширине прокатываемой полосы.

В работе [19] представлена регрессионная зависимость упругих деформаций клетки «кварто» по длине бочки рабочего валка, полученная путем моделирования численным методом упругих деформаций валковой системы «кварто». Предложенная зависимость ранее

была применена в модели формирования плоскостности горячекатаных полос на непрерывном широкополосном стане и может быть использована в рамках вновь предлагаемой комплексной методики.

Также известны работы, которые позволяют оценить износ поверхности бочек и их неравномерное тепловое расширение по длине валка [20 – 22].

Оценка вида и амплитуды дефекта плоскостности стальной катаной полосы может быть выполнена по методике, представленной в работе [23].

Достоверность полученных таким образом результатов могла бы быть проверена путем оценки показателей качества формы плоского проката в программе Deform.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Порядок расчета вида и амплитуды дефекта плоской формы холоднокатаной полосы включал в себя следующие этапы:

- первый этап – энергосиловой расчет процесса холодной прокатки;
- второй этап – расчет упругих деформаций поверхности бочки рабочего валка;
- третий этап – оценка износа поверхности бочки рабочего валка;
- четвертый этап – расчет теплового профиля валка;
- пятый этап – оценка выпуклости поперечного профиля стальной полосы;
- шестой этап – оценка показателей планшетности готовой полосы.

Первый этап реализован с использованием модели энергосиловых параметров, учитывающей участки упругого деформирования по длине очага деформации [24 – 25].

Второй этап выполнен путем моделирования упругих деформаций валковой системы клетки «кварто» с помощью программы, использующей численные методы при исследовании механики процессов.

Для определения деформации поверхности бочки рабочего валка с учетом упругого сплющивания в зонах ее контакта с бочкой опорного валка и полосы при прокатке были созданы трехмерные компьютерные модели комплектов рабочих и опорных валков клетки пятиклетевого непрерывного стана холодной прокатки 1700.

Комплект валков был импортирован в модуль Mechanical Structure программы Ansys R1 (рис. 1).

В препроцессоре данного модуля была сгенерирована сетка (рис. 1), в качестве материала валков в интеграторе Ansys Workbench задана высокоуглеродистая сталь с пределом текучести 900 МПа. Для имитации опор в качестве граничных условий для шеек опорного валка были наложены ограничения по перемещению в направлении осей X , Y и Z (вертикальное направление), а для имитации опор рабочего валка введены ограничения на перемещение вдоль осей X , Y . В вер-

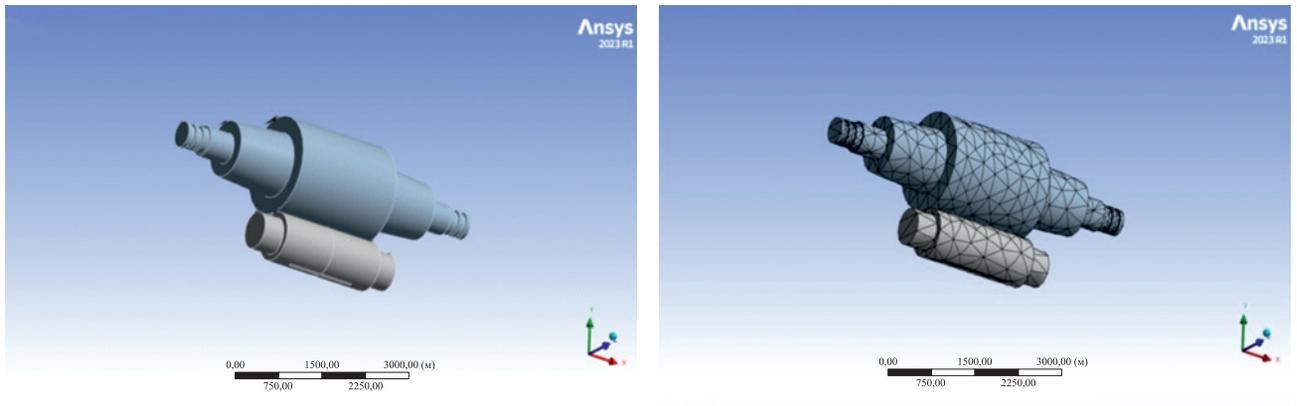


Рис. 1. Модель валковой системы клетки «кварто»

Fig. 1. Model of the roll system of “quarto” stand

тикальном направлении рабочий валок опирается на бочку опорного.

Заранее при создании твердотельной модели на поверхности бочки рабочего валка определили область, по которой будет распределено контактное давление в очаге деформации и в этой области приложили давление, равное нормальному напряжению в очаге деформации. Для этого предварительно был запущен решатель StaticStructure.

Для имитации усилия противоизгиба на торцы шеек рабочих валков приложили сосредоточенные силы, направленные вертикально по направлению оси Y .

Профилировку бочек рабочего и опорного валков, контактное давление в очаге деформации, ширину прокатываемой полосы и усилие противоизгиба рабочих

валков изменяли при моделировании в установленном диапазоне.

Цветовая диаграмма, демонстрирующая результат расчета упругих деформаций, представлена на рис. 2.

Результаты расчета разности упругих деформаций поверхности бочки рабочего валка у кромки полосы и в ее середине (упругий прогиб по ширине полосы) были обобщены в виде регрессионного уравнения

$$\Delta_{\text{дс}} - \Delta_{\text{дкр}} = 0,00001632 \cdot 10^{-5} b + 0,007703 P - 0,00000305 P_{\text{изг}} - 0,0200 \Delta D_{\text{ш.с.}} - 0,0169 \Delta D_{\text{ш.с.оп}}, \quad (1)$$

где P – сила прокатки в i -ой клетки, МН; $P_{\text{изг}}$ – сила противоизгиба рабочих валков, кН; b – ширина полосы, мм; $\Delta D_{\text{ш.с.}}$ – шлифовочная выпуклость бочки рабочего

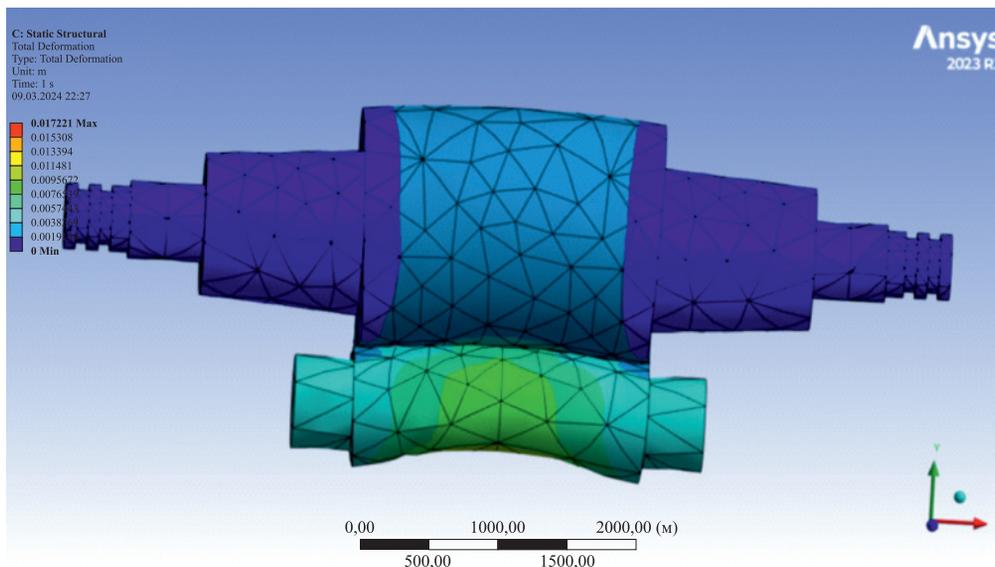


Рис. 2. Пример результата расчета упругих деформаций в вертикальной осевой плоскости валков клетки «кварто» в модуле MechanicalStructure программы Ansys R1

Fig. 2. Example of the result of calculating elastic deformations in vertical axial plane of the rolls of “quarto” stand in the MechanicalStructure module of the Ansys R1 program

Таблица 1. Результаты проверки значимости коэффициентов уравнения для расчета упругих деформаций

Table 1. Results of checking the significance of coefficients of the equation for calculating elastic deformations

Наименование параметра	Уровень статистической значимости результатов (<i>p</i> -value)
Ширина полосы, мм	0,01
Сила прокатки в <i>i</i> -ой клетки, МН	$2,07 \cdot 10^{-30}$
Сила противоизгиба рабочих валков, кН	$4,31 \cdot 10^{-9}$
Шлифовочная выпуклость бочки рабочего валка в ее середине, мм	0,02
Шлифовочная выпуклость бочки опорного валка в ее середине, мм	$4,36 \cdot 10^{-8}$
Примечание. Параметр является статистически значимым, если величина <i>p</i> -value менее 0,05.	

валка в ее середине, мм; $\Delta D_{ш.с.оп}$ – шлифовочная выпуклость бочки опорного валка в ее середине, мм.

Коэффициент множественной детерминации R^2 составил 0,86, что показывает высокую достоверность полученной зависимости.

Значимость коэффициентов в уравнении (1) оценили с помощью уровня статистической значимости (*p*-value), используя набор данных из результатов сорока вариантов моделирования, ранее представленных в работе [19]. Результаты проверки приведены в табл. 1.

Третий этап – оценка износа поверхности бочки рабочего валка выполнена на основе экспериментальных данных, содержащих параметры работы валка, данные о твердости его поверхности и профилировки [20].

Данные табл. 2 демонстрируют, что на износ влияют усилие прокатки, твердость поверхности бочки валка, диаметр его бочки и количество прокатанной на нем стальной полосы. Исходная вогнутость оказывает несущественное воздействие.

Определена зависимость износа бочки валка в ее середине и у кромок полосы от установленных влияющих факторов:

$$\Delta_c = k_p P + k_L L_m, \quad (2)$$

где P – средний уровень усилия прокатки в рабочей клетке с момента завалки рабочего валка в клетку, МН; L_m – длина полосы, прокатанной на рабочих валках в клетке m ; k_p – коэффициент влияния усилия прокатки

на износ поверхности бочки рабочего валка; k_L – коэффициент влияния длины полосы, прокатанной на рабочих валках в клетке.

Значение этих коэффициентов, например, для середины бочки валка, определены уравнением (в середине ширины полосы)

$$k_p = -0,00025HSD + 0,0000285D, \quad (3)$$

где HSD – твердость поверхности бочки валка по шкале Шора, D – диаметр бочки рабочего валка, мм (значение коэффициента множественной детерминации уравнения составил $R^2 = 0,89$);

$$k_L = -0,0000011HSD + 0,00000011D. \quad (4)$$

Четвертый этап – расчет теплового профиля бочки валка.

Расчет теплового режима непрерывного стана холодной прокатки производится путем составления и совместного решения уравнений теплового баланса рабочих и опорных валков, а также полосы. Использование такой модели для процессов непрерывной холодной и горячей прокатки стальной полосы представлено в уже упомянутых работах [21; 22].

Тепловая выпуклость бочки валка по ширине полосы рассчитывается с учетом найденной из системы уравнений температуры бочки валка в ее середине.

Пятый этап – оценка профиля полосы, может быть выполнена с учетом найденных на предыдущих

Таблица 2. Результаты оценки коэффициентов корреляции Пирсона параметров валков и технологии с величиной износа поверхности бочки

Table 2. Results of assessing the Pearson correlation coefficients of the rolls parameters and technology with amount of the barrel surface wear

Наименование параметра	Усилие прокатки, МН	Твердость бочки валка, HSD	Диаметр валка, мм	Наработка валка, м	Исходная вогнутость поверхности бочки валка в ее середине, мм
Величина коэффициента	-0,4755	0,4277	-0,4055	0,4839	0,012

этапах расчета компонент, определяющих форму сечения готового плоского проката на выходе из валков:

- исходная шлифовочная профилировка с учетом ее текущего износа, $\Delta_{шy}$;
- упругая деформация поверхности бочки вала, $\Delta_{дy}$;
- тепловой профиль (тепловая выпуклость) поверхности бочки вала, $\Delta_{тy}$;
- номинальная толщина полосы, h_i .

Толщина полосы в произвольной точке по ее ширине с координатой y составит:

$$\Delta_{iy} = h_i - \Delta_{шy} + \Delta_{дy} - \Delta_{тy}.$$

Шестой этап – оценка показателей планшетности готовой полосы, может быть реализована с применением зависимостей, представленных в работе [23].

Зная толщины подката и проката по их ширине и, следовательно, коэффициенты вытяжки у кромок полосы и в ее середине, возможно оценить наиболее важный параметр дефекта планшетности по ГОСТ 19903 – 2015 – амплитуду дефекта плоскостности:

– «волна», образовавшаяся в i -ой клетки непрерывной группы клетей:

$$a_{bi} = \frac{hE \left[1 - \cos \left(\frac{2\sigma_k (\lambda_{кр} - \lambda_c)}{hE} \right) \right]}{\sigma_k}, \quad (5)$$

где h – толщина полосы, E – модуль упругости полосы, σ_k – критическое напряжение потери устойчивости, $\lambda_{кр}$, λ_c – коэффициенты вытяжки у кромки полосы и в середине ее ширины, определяемые, исходя из формы сечения подката и полосы на выходе из валков;

– «короб», образовавшийся в i -ой клетки непрерывной группы клетей:

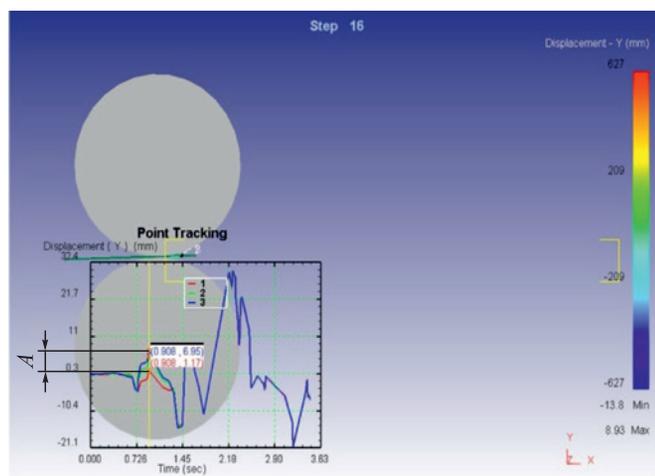


Рис. 3. Пример оценки дефекта плоскостности полосы «волна» (A – амплитуда «волны» на полосе)

Fig. 3. Example of assessing flatness defect of the “wave” strip (A – amplitude of “wave” on the strip)

$$a_{ki} = \frac{hE \left[1 - \cos \left(\frac{2\sigma_k (\lambda_c - \lambda_{кр})}{hE} \right) \right]}{\sigma_k}. \quad (6)$$

При этом подтверждено [23], что дефект планшетности полосы будет «накапливаться» на полосе от клетки к клетю. Тогда, если тот же вид дефекта планшетности проявится в последующих клетях, то амплитуды его будут суммироваться.

Оценку достоверности расчета вида и амплитуды волны по формулам (4) и (5) выполнили путем моделирования процесса прокатки в программе Deform 3D. Для этого создали бочки валков с продольным профилем, учитывающим упругую деформацию и тепловую выпуклость бочки на ширине полосы. Также возможно учесть неравномерный износ поверхности бочки. Создали подкат с заданным профилем поперечного сечения и промоделировали технологический процесс. В постпроцессоре оценили путем отслеживания точек по ширине полос разность перемещений в вертикальном направлении середины и кромки полосы.

На рис. 3 линия 3 показывает перемещение в вертикальном направлении точки полосы у ее кромки, линия 1 – в середине ширины полосы. Разницу в перемещении в вертикальном направлении кромки полосы и середины ее ширины принимали за амплитуду дефекта.

Пример оценки амплитуды в программе Deform 3D представлен на рис. 4.

Результаты оценки достоверности аналитической методики с использованием данных, полученных в программе Deform 3D, демонстрируют достаточную достоверность модели для применения ее при прогнозировании плоскостности холоднокатаной полосы.

Выводы

Известной причиной возникновения дефектов плоской формы на готовых стальных холоднокатаных поло-

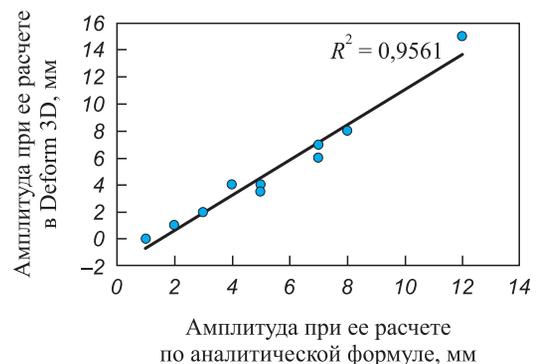


Рис. 4. Сравнение результатов расчета амплитуды неплоскостности

Fig. 4. Comparison of the results of calculating the non-flatness amplitude

сах является неравенство коэффициентов вытяжки по ширине полосы. На разницу значений этих коэффициентов оказывают влияние параметры профилировок бочек валков, энергосиловые параметры прокатки, параметры работы системы автоматического регулирования профиля и формы полосы. Воздействие всех технологических факторов на форму полосы будет иметь сложный характер. В работе рассмотрен подход, учитывающий основные параметры работы прокатного оборудования, позволяющий оценить вид и амплитуду дефектов плоскостности готовых стальных полос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Shalaevskii D.L. Models for the formation of flatness defects of steel strip during its rolling and heat treatment. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024;2024(7):1760–1764. <https://doi.org/10.1134/S0036029524703063>
2. Будакова А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н. Профилирование валков листовых станов. Киев: Техника; 1986:190.
3. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. Москва: Теплотехник; 2008:355.
4. Шаталов Р.Л., Максимов Е.А., Верхов Е.Ю. Рациональные режимы управления плоскостностью полос при тонколистовой реверсивной прокатке / *Научно-технический прогресс в черной металлургии: Материалы II Международной научно-технической конференции (7 – 9 октября 2015 г.)*. Череповец: Череповецкий государственный университет; 2015:148–151.
5. Шаталов Р.Л., Максимов Е.А. Уточнение метода расчета критических напряжений и показателей плоскостности полосы при тонколистовой прокатке. *Сталь*. 2016; (4):26–30.
Shatalov R.L., Maksimov E.A. Clarification of the method for calculating critical stresses and flatness indices of strip during thin-sheet rolling. *Stal'*. 2016;(4):26–30. (In Russ.).
6. Иевлев Н.Г. Математические модели плоскостности толстолиствого проката применительно к АСУ ТП. *Математичні машини і системи*. 2018;(1):67–77.
Ievlev N.G. Mathematical models of flatness of thick sheet metal applied to automated process control systems. *Matematichni mashini i sistemi*. 2018;(1):67–77. (In Russ.).
7. Шаталов Р.Л., Максимов Е.А. Анализ эффективности технологии асимметричной прокатки для повышения точности прокатываемых полос. *Металлург*. 2016;(7):80–84.
Shatalov R.L., Maksimov E.A. Analysis of asymmetric rolling efficiency for increasing accuracy of rolled strips. *Metallurg*. 2016;(7):80–84. (In Russ.).
8. Бартхольдт Х., Копин Ф., Джелали М. Универсальная модель плоскостности для оптимизации процесса холодной прокатки. *Черные металлы*. 2015;(3):53–58.
Bartkhol'dt Kh., Kopin F., Dzhelali M. Universal flatness model for process optimization in cold rolling mills. *Chernye metally*. 2015;(3):53–58. (In Russ.).
9. Шалаевский Д.Л., Митрофанов А.В., Корепина К.П. Повышение плоскостности готовых стальных полос на энергосберегающих режимах непрерывной горячей прокатки. *Сталь*. 2022;(2):15–17.
Shalaevskii D.L., Mitrofanov A.V., Korepina K.P. Improvement in the flatness of finished steel strips under energy saving regimes of continuous hot rolling. *Stal'*. 2022;(2):15–17. (In Russ.).
10. Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Мишнев П.А., Михеева И.А., Палигин Р.Б. Улучшение плоскостности горячекатаных стальных широких полос путем оптимизации настройки параметров технологического режима / *Всероссийская научно-практическая конференции «Проблемы черной металлургии – 2015. Международный научный семинар»*. 2016:76–82.
11. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А. и др. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. Москва: Металлургия; 1983:120.
12. Пименов В.А., Бельский С.М., Кузнецова Е.В., Шкарин А.Н. Математическая модель идентификации формы профиля поперечного сечения горячекатаных полос и распределения вытяжек по ширине холоднокатаных полос. Сообщение 1. *Производство проката*. 2018;(1):11–15.
Pimenov V.A., Bel'skii S.M., Kuznetsova E.V., Shkarin A.N. Mathematical model for identifying the shape of profile with primary cross-section of hot-rolled strips and distribution of extensions across the width of cold-rolled strips. Report 1. *Proizvodstvo prokata*. 2018;(1):11–15. (In Russ.).
13. Пименов В.А., Бельский С.М., Кузнецова Е.В., Шкарин А.Н. Математическая модель идентификации формы профиля поперечного сечения горячекатаных полос и распределения вытяжек по ширине холоднокатаных полос. Сообщение 2. *Производство проката*. 2018;(6):9–14.
Pimenov V.A., Bel'skii S.M., Kuznetsova E.V., Shkarin A.N. Mathematical model for identifying the shape of profile with primary cross-section of hot-rolled strips and distribution of extensions across the width of cold-rolled strips. Report 2. *Proizvodstvo prokata*. 2018;(6):9–14. (In Russ.).
14. Шкарин А.Н. Формирование плоскостности холоднокатаных полос с учетом особенностей профиля поперечного сечения горячекатаного подката: Автореферат диссертации ... кандидата технических наук. 2021.
15. Wang X., Yang Q., He A. Calculation of thermal stress affecting strip flatness change during run-out table cooling in hot steel strip rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;207(1-3):130–146. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.076>
16. Hrabovsky J., Pohanka M., Lee P.J., Kang J.H. Experimental and numerical study of hot-steel-plate flatness. *Materials and Technology*. 2016;50(1):17–21. <https://doi.org/10.17222/mit.2014.153>
17. Wu H., Sun J., Lu X., Peng W. Predicting stress and flatness in hot-rolled strips during run-out table cooling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;84:815–831. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.053>
18. Божков А.И., Ковалев Д.А., Черников О.В., Юсупов В.С., Ивлиев С.Н., Дегтев С.С. Влияние режимов термообработки на плоскостность полос электротехнических изотропных сталей. Сообщение 2. *Сталь*. 2019;(2):26–28.
Bozhkov A.I., Kovalev D.A., Chernikov O.V., Yusupov V.S., Ivliev S.N., Degtev S.S. Influence of heat treatment on the planarity of isotropic electrical steel strip. Part 2. *Steel in Translation*. 2019;49(2):131–133. <https://doi.org/10.3103/S0967091219020049>

19. Шалаевский Д.Л. Прогнозирование плоскостности стальной полосы на основе разности коэффициентов вытяжек по ее ширине при прокатке. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2024;80(10):20–27.
Shalaevskii D.L. Prediction of steel strip flatness based on the difference in drawing coefficients along its width during steel strip rolling. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2024;80(10): 20–27. (In Russ.).
20. Шалаевский Д.Л., Сидоров А.В. Исследование износа поверхности бочек рабочих валков непрерывной группы клетей широкополосного стана горячей прокатки. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2024;22(7):315–318.
<https://doi.org/10.36652/1684-1107-2024-22-7-315-318>
Shalaevskiy D.L., Sidorov A.V. Study of wear on surface of work rolls barrels of continuous stands of a wide strip hot rolling mill. *Zagotovitel'nyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2024;22(7):315–318. (In Russ.).
<https://doi.org/10.36652/1684-1107-2024-22-7-315-318>
21. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки: (теория, оборудование, технология). Москва: ОАО “Черметинформация”; 2004:412.
22. Шалаевский Д.Л. Исследование теплового режима рабочих валков стана горячей прокатки с целью повышения точности расчета температур поверхностей их бочек. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023; 66(3):283–289.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-283-289>
Shalaevskii D.L. Investigation of thermal mode of hot-rolling mill working rolls in order to improve the accuracy of calculating the thermal profile of their barrels' surface. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(3):283–289.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-283-289>
23. Шалаевский Д.Л. Исследование влияния технологических факторов при непрерывной горячей прокатке на плоскостность тонких стальных листов с целью повышения их качества. *Металлы*. 2024;(5):62–68.
<https://doi.org/10.31857/S0869573324056268>
Shalaevskii D.L. Investigation of the influence of technological factors on continuous high-speed rolling on flatness of thin steel sheets with the aim of increasing their quality. *Metally*. 2024;(5):62–68. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0869573324056268>
24. Шалаевский Д.Л., Козhevnikov А.В. Алгоритм и дизайн методологии для энергоэффективной продукции производства технологии. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;718:012015.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/718/1/012015>
25. Garber E.A., Shalaevskii D.L., Kozhevnikova I.A., Traino A.I. Procedure and algorithms for the energy-force calculation of cold rolling allowing for the number of neutral sections in the deformation zone. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2008;2008(4):315–325.
<https://doi.org/10.1134/S0036029508040083>

Сведения об авторе

Information about the Author

Дмитрий Леонидович Шалаевский, к.т.н., доцент кафедры металлургии, машиностроения и технологического оборудования, Череповецкий государственный университет
ORCID: 0000-0002-0443-4135
E-mail: shal-dmitrij@yandex.ru

Dmitrii L. Shalaevskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metallurgy, Mechanical Engineering and Technological Equipment”, Cherepovets State University
ORCID: 0000-0002-0443-4135
E-mail: shal-dmitrij@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.04.2025
После доработки 19.06.2025
Принята к публикации 20.06.2025

Received 25.04.2025
Revised 19.06.2025
Accepted 20.06.2025