

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ
METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.771.07: 621.787.6

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-36-43

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА КОЛЕБАНИЙ ПАРАМЕТРОВ
МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛОСЫ ПРИ ДРЕССИРОВКЕ
ЕЕ В ШЕРОХОВАТЫХ ВАЛКАХ ДРЕССИРОВОЧНОГО СТАНА****Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Терентьев Д.В., Румянцев М.И.**

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Предложен теоретический метод определения диапазона колебания параметров микрогеометрии поверхности холоднокатаной полосы при дрессировке ее в шероховатых валках с учетом возмущающего действия элементов оборудования дрессировочного стана и разнотолщинности подката. Получены количественные данные по влиянию нестабильности натяжения дрессируемой полосы, биению опорных валков и изменению состояния шероховатых поверхностей валка и подката на диапазон колебания коэффициента репродукции параметра $R_{ан}$ поверхности валка на полосу и параметра $R_{ан}$ поверхности продрессированной полосы. На примере наиболее востребованного проката шириной 1500-2000 мм и толщиной 0,65-0,9 мм с допускаемыми отклонениями от $\pm 0,07$ до $\pm 0,11$ мм в зависимости от группы его точности по ГОСТ 19904-90 показано, что колебание параметра R_a продрессированной полосы только по разнотолщинности составляет от 3,4% для высокой точности проката до 5,6% для нормальной точности. С учетом влияния всех возмущающих факторов на процесс дрессировки диапазон колебаний параметра R_a шероховатой поверхности полосы может достигать значений 10,2 и 13,8% в зависимости от уровня действия возмущающих факторов, если не используются системы автоматического регулирования толщины полосы (САРТ). Полученные результаты могут быть использованы специалистами прокатного производства для корректировки состояния оборудования дрессировочного стана и условий его эксплуатации с целью удовлетворения потребителей холоднокатаного листа дрессированной полосы по показателям диапазона колебания параметра R_a .

Ключевые слова: колебание параметров шероховатости, холоднокатаная полоса, дрессировка

© Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Терентьев Д.В., Румянцев М.И., 2025

Для цитирования

Определение диапазона колебаний параметров микрогеометрии поверхности полосы при дрессировке ее в шероховатых валках дрессировочного стана / Е.Ю. Звягина, Н.Н. Огарков, Д.В. Терентьев, М.И. Румянцев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 36-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-36-43>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DETERMINING THE FLUCTUATION RANGE IN THE MICROGEOMETRY PARAMETERS OF THE STRIP SURFACE DURING TEMPER ROLLING IN ROUGH ROLLS OF THE TEMPER MILL

Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N., Terentyev D.V., Rumyantsev M.I.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. A theoretical method is proposed for determining the fluctuations range in the parameters of the microgeometry of the cold-rolled strip surface during its tempering in rough rolls, taking into account the disturbing effect of the temper mill equipment elements and the thickness of semi-finished rolled stock. Quantitative data were obtained on the effect of tension instability of the tempered strip, run-out of the support rolls and changes in the state of the rough surfaces of the roll and semi-finished rolled stock on the range of fluctuations in the reproduction coefficient of the parameter R_{av} of the roll surface on the strip and the parameter R_{ap} of the surface of the tempered strip. Using the example of the most popular rolled products with a width of 1500-2000 mm and a thickness of 0.65-0.9 mm with acceptable deviations from ± 0.07 to ± 0.11 mm, depending on the accuracy group according to GOST 19904-90, it is shown that the variation in the R_a parameter of the tempered strip only in thickness ranges from 3.4% for high accuracy to 5.6% for normal accuracy. Taking into account the influence of all disturbing effects on the tempering process, the range of fluctuations in the R_a parameter of the rough surface of the strip can reach values of 10.2 and 13.8%, depending on the level of disturbing effects, if automatic strip thickness control systems are not used. The results obtained can be used by rolling mill specialists to adjust the condition of the temper mill equipment and its operating conditions in order to satisfy consumers of cold-rolled sheet of tempered strip in terms of the fluctuations range of the parameter R_a .

Keywords: fluctuation of roughness parameters, cold-rolled strip, tempering

For citation

Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N., Terentyev D.V., Rumyantsev M.I. Determining the Fluctuation Range in the Microgeometry Parameters of the Strip Surface During Temper Rolling in Rough Rolls of the Temper Mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 36-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-36-43>

Введение

Потребители холоднокатаной тонкой листовой стали постоянно повышают требования к ее качеству, что связано с намерениями получить больший экономический эффект на последующих ее переделах. Одним из показателей качества холоднокатаной листовой стали является соответствие параметров микрогеометрии ее поверхности регламентируемым значениям ГОСТ и ТУ. При этом довольно жесткие требования предъявляются к обеспечению минимума колебаний этих параметров как по длине, так и по ширине холоднокатаной полосы.

Основным способом окончательного формирования микрогеометрии поверхности холоднокатаной полосы является дрессировка отожженной без покрытия или оцинкованной полосы в шероховатых валках дрессировочного стана с репродукцией в той или иной степени параметров микрогеометрии поверхности рабочего вала на поверхность дрессируемой полосы. Степень репродукции характеризуется коэффициентом, определяемым отношением усредненного параметра микрогеометрии поверхности дрессируемой полосы $R_{ап}$ к усредненному параметру микрогеометрии поверхности рабочего вала $R_{ав}$ и записывается в виде $K = R_{ап} / R_{ав}$ [1-7].

Этот коэффициент репродукции характерен при номинальных значениях параметров дрессировки. В производственных условиях процесс дрессировки не

реализуется в строго номинальных его параметрах, поскольку имеют место некоторые отклонения от них из-за нестабильности натяжения полосы, биения и крутильных колебаний валковой системы, колебания коэффициента трения в очаге деформации, изменения состояния шероховатых слоев поверхностей вала и дрессируемой полосы, разнотолщинности подката и неравномерности его механических свойств и др.

В целом производители холоднокатаного листа, несмотря на фиксируемые в процессе производства колебания параметров микрогеометрии поверхности полосы, в основном укладываются в жестко регламентируемые потребителями диапазоны допускаемых колебаний. Тем не менее, например, в 2012 году претензии в адрес производителя со стороны ОАО «АвтоВАЗ» по несоответствию микрогеометрии составила 36%, исходя из процентного распределения дефектов автомобильного листа. Причиной претензии стало завышенное фактическое значение диапазона колебания параметров микрогеометрии [8].

Исходя из вышеизложенного, следует, что в условиях жесткого регламентирования границ допускаемых колебаний параметров микрогеометрии дрессированной полосы необходимо сформулировать представление о влиянии элементов оборудования дрессировочного стана и режимов дрессировки на эти колебания, чтобы минимизировать их возмущающее действие и стабилизировать процесс репродукции

микрogeометрии поверхности рабочего вала на дрессируемую полосу.

Оценку возмущающих действий элементов оборудования и режимов дрессировки выполним с использованием формул для расчета коэффициента репродукции K , приведенных в работах [4, 5]:

$$K = \frac{1}{2}(\sqrt{b^2 + 4ac} - b), \quad (1)$$

где $a=1$; $b=i+2$; $c=i-1$;

$$i = \left[\frac{P\sqrt{3}\pi}{\sigma_s 4(q_b + q_n)} + 2 - \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{S}{h_0} \right) \right]^2.$$

P – давление дрессируемого металла на валки, МПа, определяемое по зависимости

$$P = \frac{\sigma_d h_0 (1 - \varepsilon)}{\mu L} \left\{ \exp \left[\frac{\mu L}{h_0 (1 - \varepsilon)} \right] - 1 \right\}, \quad (2)$$

где ε – степень деформации при дрессировке полосы;
 μ – коэффициент трения в очаге деформации;
 h_0 – толщина дрессируемой полосы, мм;
 L – длина дуги контакта дрессируемой полосы с рабочим валком, мм.

$$L = 0,5 \left[D_b \varepsilon \frac{\mu}{2} + \sqrt{\left(D_b \varepsilon \frac{\mu}{2} \right)^2 + 2 D_b h_0 \varepsilon} \right], \quad (3)$$

где D_b – диаметр рабочего вала, мм;
 σ_d – минимальное напряжение, которое необходимо для деформации полосы при дрессировке, МПа.

$$\sigma_d = 1,15 \left[\sigma_s + 1,1 \log \left(\frac{2000 \cdot V}{D_b \mu} \right) \right] - \sigma_t, \quad (4)$$

где V – скорость дрессировки, м/с;
 σ_s – предел текучести дрессируемого металла, МПа;
 σ_t – растягивающее напряжение в очаге деформации от натяжения дрессируемой полосы, МПа.

Ниже приведены количественные данные по колебанию коэффициента репродукции параметров микрogeометрии поверхности рабочего вала на дрессируемую полосу в зависимости от возмущающих факторов в системе дрессировочного стана, рассчитанные по формулам (1)–(4) без учета разнотолщинности подката. Расчеты выполнены для следующих условий дрессировки: скорость дрессировки 15 м/с, предел текучести материала дрессируемой полосы $\sigma_s = 230$ МПа, ширина полосы 1500-2000 мм, толщина полосы 0,7 мм, диаметр рабочего вала 0,45 м, степень деформации $\varepsilon = 0,02$, натяжение полосы $\sigma_t = 0,2\sigma_s$, относительное количество материала в шероховатом слое поверхности рабочего вала $q_b = 0,538$ и поверхности полосы $q_n = 0,565$ [5], шаг шероховатости поверхности вала $S = 0,09$ мм, исходный высотный па-

раметр микрogeометрии поверхности рабочего вала $R_{an} = 2,7$ мкм, дрессировка «сухая».

Исходя из среднестатистических показателей исследований и опыта эксплуатации дрессировочных станков, определены минимальные и максимальные уровни возмущающих действий на процесс дрессировки [9-14]: колебание натяжения 3-5% σ_t , биение опорного вала с учетом биения цилиндрических, конических шеек и гармоники формы его бочки $\delta S_b = 0,05 - 0,1$ мм, изменение относительного количества материала в шероховатом слое рабочего вала $\Delta q_b = \pm 0,5\%$ и дрессируемой полосы $\Delta q_n = \pm 0,5\%$ в пределах дрессировки одного рулона.

Изменение шагового параметра ΔS определено по изменению частотного параметра микрogeометрии поверхности рабочего вала дрессировочной клетки. Поскольку между частотным и шаговым параметрами имеет место обратно пропорциональная зависимость, то относительные колебания частотного параметра полностью соответствуют относительным колебаниям шагового параметра. По данным, приведенным в работе [15], усредненные значения колебаний частотного параметра по трем зонам поверхности вала (в центре и по краям) составляют 6% для верхнего вала и 9% для нижнего вала при объеме продрессированного металла 40 т.

Результаты расчетов по формулам (1)-(4) колебания коэффициента репродукции ΔK и параметра микрogeометрии поверхности дрессируемой полосы ΔR_a от их номинальных значений в зависимости от возмущающих действий элементов оборудования дрессировочного стана на процесс дрессировки полосы толщиной 0,7 мм без учета других факторов приведены в **табл. 1**.

Суммарные значения колебания коэффициента репродукции параметров микрogeометрии поверхности вала на дрессируемую полосу, полученные из условия суперпозиции возмущающих действий от элементов оборудования дрессировочного стана составляют $\Sigma \Delta K = 0,0267$ – при низком их уровне возмущающих действий и $\Sigma \Delta K = 0,048$ – при высоком уровне. Доли участия каждого возмущающего фактора от суммарного возмущающего действия элементов оборудования дрессировочного стана в процентном их выражении иллюстрирует **рис. 1**.

Наибольшее из возмущающих действий элементов оборудования дрессировочного стана оказывает биение опорных валков, составляющее от 48 до 50% в зависимости от уровня возмущающих действий. Суммарное влияние характеристик шероховатых слоев, участвующих в процессе дрессировки q_b , q_n , S , составляет около 29% независимо от уровня возмущающих действий элементов оборудования.

С целью стабилизировать параметры микрogeометрии поверхности рабочих валков и минимизировать влияние изменения состояния поверхности рабочих валков на коэффициент репродукции в реальных условиях применяют холостую обкатку рабочих валков на дрессировочном стане без полосы между ними [16].

Таблица 1. Колебание коэффициента репродукции ΔK и отклонение параметра R_a микрогеометрии поверхности дрессируемой полосы в зависимости от возмущающих действий элементов дрессировочного стана на процесс дрессировки холоднокатаной полосы толщиной 0,7 мм

Table 1. Fluctuation of the reproduction coefficient ΔK and deviation of the parameter R_a of the microgeometry of the surface of the tempered strip, depending on the disturbing effects of the elements of the temper mill on the tempering process of a 0.7 mm thick cold-rolled strip

Возмущающие параметры оборудования стана	Уровни возмущающих действий	Диапазон колебаний возмущающих действий	Коэффициент репродукции K	Колебания коэффициента репродукции ΔK от номинального	Абсолютное отклонение параметра ΔR_{ap} от номинального, мкм	Относительное отклонение параметра R_{ap} от номинального, %	Доля в суммарном возмущающем действии оборудования дрессировочного стана, %
$\Delta\sigma_t$	низкий	+3% -3%	0,582 0,588	0,003 0,003	0,0081 0,0081	0,513 0,513	22,55
	высокий	+5% -5%	0,580 0,590	0,005 0,005	0,0135 0,0135	0,855 0,855	20,8
δS_b	низкий	0,05 мм	0,598	0,013	0,0351	2,223	48,85
	высокий	0,1 мм	0,609	0,024	0,0648	4,104	50
Δq_v	низкий	+0,5% -0,5%	0,584 0,5655	0,001 0,0015	0,0027 0,004	0,171 0,255	9,36
	высокий	+1,0% -1,0%	0,583 0,588	0,002 0,003	0,0054 0,0081	0,342 0,513	10,4
Δq_n	низкий	+0,5% -0,5%	0,584 0,5655	0,001 0,0015	0,0027 0,004	0,171 0,253	9,32
	высокий	+1,0% -1,0%	0,583 0,588	0,002 0,003	0,0054 0,0081	0,343 0,513	10,4
ΔS	низкий	+6,0% -6,0%	0,5835 0,5862	0,0015 0,0012	0,004 0,0032	0,253 0,203	10
	высокий	+9,0% -9,0%	0,58828 0,5868	0,0022 0,0018	0,006 0,0049	0,38 0,31	8,4
Итого Σ значение	низкий			0,0267	0,0719	4,55	100
	высокий			0,048	0,1297	8,215	100

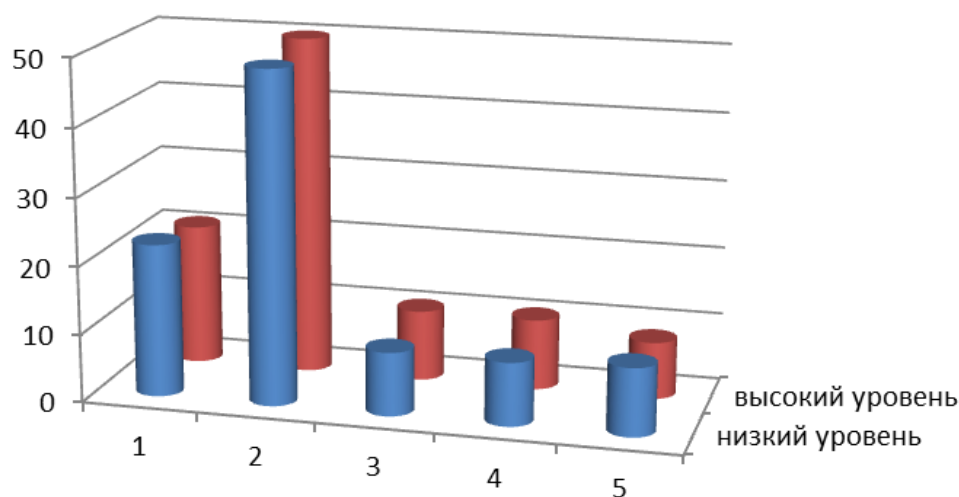


Рис. 1. Процентное распределение возмущающих действий от элементов дрессировочного стана, влияющих на колебание коэффициента репродукции микрогеометрии поверхности рабочего вала на дрессируемую полосу в зависимости от уровня возмущающих действий: 1 – $\Delta\sigma_t$; 2 – δS_b ; 3 – Δq_v ; 4 – Δq_n ; 5 – ΔS

Fig. 1. Percentage distribution of disturbing effects from elements of the temper mill that affect the fluctuation of the reproduction coefficient of the microgeometry of the working roll surface on the temper strip, depending on the level of disturbing effects: 1 – $\Delta\sigma_t$; 2 – δS_b ; 3 – Δq_v ; 4 – Δq_n ; 5 – ΔS

Кроме возмущающих действий на процесс дрессировки холоднокатаной полосы со стороны элементов оборудования, на процесс дрессировки, а соответственно, и на коэффициент репродукции оказывает влияние разнотолщинность подката.

Поскольку разнотолщинность оказывает существенное влияние на величину изменения коэффициента репродукции, то целесообразно оценить его колебания и, соответственно, параметр R_a , на примере наиболее востребованного холоднокатаного проката шириной 1500–2000 мм и толщиной 0,65–0,9 мм. Согласно ГОСТ 19904-90 при таком сортаменте предельные отклонения составляют для проката высокой точности $\pm 0,07$ мм, а для повышенной точности $\pm 0,11$ мм.

Результаты расчетов колебания коэффициента репродукции ΔK и параметра микрогеометрии поверхности дрессируемой полосы R_a в зависимости от предельных отклонений размеров для каждого класса точности, как без учета влияния других возмущающих факторов, так и с учетом вышепринятых значений колебаний натяжения дрессируемой полосы, величины биения опорных валков и изменений характеристик шероховатых слоев поверхности рабочего валка и дрессируемой полосы сведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что доля разнотолщинности подката, оказывающего возмущающее действие на колебание коэффициента репродукции шероховато-

сти поверхности валка на дрессируемую полосу, составляет от 36% при высокой точности проката до 55% при его нормальной точности от суммарного возмущающего действия всех факторов, влияющих на процесс дрессировки. Остальные 45–64% приходятся на возмущающие действия от оборудования дрессировочного стана. Для уменьшения влияния разнотолщинности подката на параметр шероховатости R_a на практике применяют САРТ.

Колебание параметра микрогеометрии поверхности дрессированной холоднокатаной полосы R_a только от допускаемого отклонения от номинальной ее толщины для высокой точности проката от 2,56–3,42% и до 4,1–5,64% для нормальной точности могут стать дефектом, называемым «теневые полосы», поскольку разные участки поверхности металла имеют различную отражательную способность.

Колебание параметра микрогеометрии поверхности R_a дрессируемой полосы с наложением на него влияния всех возмущающих факторов при низком уровне их действий с 7,1–10,2% и при высоком уровне 10,7–13,8% может вызвать не только дефект «теневые полосы», но и дефект «ребристость», если он характеризуется периодичностью, например, от биения опорного валка. Из-за таких дефектов холоднокатаный прокат по качеству переводят из I во II группу отделки поверхности, снижая его стоимость [2, 3, 7, 14].

Таблица 2. Влияние колебания толщины дрессируемой полосы на изменение коэффициента репродукции ΔK параметра микрогеометрии поверхности полосы R_a

Table 2. The effect of fluctuations in the thickness of the tempered strip on the change in the reproduction coefficient ΔK of the microgeometry parameter of the strip surface R_a

Точность изготовления проката (ГОСТ 19904-90)	Допустимые отклонения от номинальной толщины	Толщина полосы h , мм	Коэффициент репродукции K	Отклонение коэффициента репродукции от номинального значения ΔK	Суммарное отклонение ΔK с учетом других возмущающих факторов $\Sigma \Delta K$	Отклонение параметра R_a поверхности полосы только от разнотолщинности проката ΔR_a , мкм	Суммарное отклонение параметра R_a с учетом всех возмущающих факторов ΣR_a , мкм	Относительное отклонение параметра R_a только от разнотолщинности проката, %	Суммарное отклонение параметра R_a с учетом всех возмущающих факторов, %	Доля участия разнотолщинности в суммарном действии всех возмущающих факторов, %
Высокая	+0,07	0,77	0,5697	0,015	$\frac{0,0417}{0,063}$	0,0405	$\frac{0,112}{0,17}$	2,56	$\frac{7,1}{10,77}$	$\frac{36,0}{23,8}$
	-0,07	0,63	0,6047	0,02	$\frac{0,0467}{0,068}$	0,054	$\frac{0,126}{0,184}$	3,42	$\frac{7,98}{11,65}$	$\frac{42,8}{29,4}$
Повышенная	+0,09	0,79	0,5646	0,02	$\frac{0,0467}{0,068}$	0,0543	$\frac{0,126}{0,184}$	3,44	$\frac{7,98}{11,65}$	$\frac{42,8}{29,4}$
	-0,09	0,61	0,611	0,026	$\frac{0,0527}{0,074}$	0,071	$\frac{0,142}{0,2}$	4,5	$\frac{9,0}{12,67}$	$\frac{49,3}{35,0}$
Нормальная	+0,11	0,81	0,5607	0,024	$\frac{0,0507}{0,072}$	0,0648	$\frac{0,137}{0,194}$	4,1	$\frac{8,68}{12,29}$	$\frac{47,3}{33,3}$
	-0,11	0,59	0,618	0,033	$\frac{0,0597}{0,081}$	0,0891	$\frac{0,161}{0,219}$	5,64	$\frac{10,2}{13,87}$	$\frac{55,2}{40,7}$

Примечание. Числитель и знаменатель – соответственно низкий и высокий уровень возмущающих действий элементов оборудования дрессировочного стана.

Анализ колебаний коэффициента репродукции микрогеометрии поверхности валка на дрессируемую полосу и, соответственно, параметра R_a полосы показывают, что они характеризуются существенными отклонениями в зависимости от применяемого оборудования и технологического процесса. Так, например, по данным [17] дрессировка на двухклетевом реверсивном стане холоднокатаной полосы толщиной 0,8 мм и шириной 1400 мм способствует получению полосы с R_a в диапазоне 0,9–1,1 мкм, что в относительном измерении его колебание составляет 18–22%. Дрессировка отожженной холоднокатаной полосы толщиной 0,7 мм аналогичной ширины на непрерывном широкополосном стане сопровождается колебанием параметра R_a в пределах 0,9–1,2 мкм, что соответствует относительной величине колебания R_a в 25–33%. По данным работы [15], колебания параметра R_a после дрессировки полосы на стане 2500 составили от 8,8 до 12,7%.

Сопоставление расчетных значений колебания коэффициента репродукции и параметра R_a микрогеометрии поверхности дрессированной полосы с колебаниями параметра R_a на практике показывает, что расчетные значения удовлетворительно укладываются в диапазон колебаний параметра R_a при дрессировке полос на дрессировочных станах и могут быть использованы для получения более стабильной микрогеометрии поверхности готовой тонколистовой продукции.

Выводы

Сформулировано представление по влиянию возмущающего действия на процесс дрессировки со стороны оборудования дрессировочного стана и разнотолщинности подката. Получены количественные данные по влиянию нестабильности натяжения дрессируемой полосы, биению опорных валков и изменению состояния шероховатых поверхностей валка и подката на диапазон колебания параметра R_a поверхности продрессированной полосы. В зависимости от уровня возмущающего действия со стороны элементов оборудования дрессировочного стана диапазон колебания коэффициента репродукции параметров шероховатости поверхности валка на дрессируемую полосу составляет 0,0267 при низком уровне возмущающих действий и 0,048 при высоком уровне от его номинального значения. Относительное колебание параметра R_a на дрессированной полосе составляет 4,55 и 8,2% соответственно при низком и высоком уровне возмущающих действий со стороны элементов оборудования дрессировочного стана.

На примере наиболее востребованного проката шириной 1500–2000 мм и толщиной 0,65–0,9 мм с допускаемыми отклонениями от $\pm 0,07$ до $\pm 0,11$ мм в зависимости от группы его точности по ГОСТ 19904-90 показано, что колебания параметра R_a продрессированной полосы только от разнотолщинности без учета возмущающих действий со стороны элементов оборудования дрессировочного стана составляет от

3,4% для высокой точности проката до 5,6% для нормальной точности.

С учетом всех возмущающих факторов диапазон колебаний параметра R_a шероховатой поверхности полосы может достигать значений 10,2 и 13,8% в зависимости от уровня действия возмущающих факторов, если не используются системы САРТ.

Полученные в работе результаты могут быть использованы специалистами прокатного производства с применением методологии улучшения листопркатных технологических систем [18] для корректировки состояния оборудования дрессировочного стана и условий его эксплуатации с целью удовлетворения потребителей дрессированной полосы по показателям диапазона колебания параметра R_a .

Список источников

1. Белов В.К., Губарев Е.В. Сравнение микрофотографии автолиста, произведенного по различной технологии // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы 80-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Т. 2. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. С. 151. EDN WPYXVK.
2. Мазур В.Л. Качество тонколистовой холоднокатаной стали: обеспечение заданной шероховатости поверхности в производственных условиях // Сталь. 2018. № 1. С. 25-30.
3. Мазур В.Л. Научные основы технологии производства проката с заданной шероховатостью поверхности // Сталь. 2015. № 5. С. 59-66.
4. Анализ и математическое моделирование репродукции микрогеометрии текстурированной поверхности валка на оцинкованной холоднокатаной полосе при ее дрессировке / Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Горбатюк С.М., Шешенин Е.В., Ибрагимов Х.Ф. // Металлург. 2024. № 2. С. 88-94.
5. Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Исмагилов Р.Р. Теоретический анализ формирования шероховатости автомобильного листа при дрессировке в валках, обработанных дробью // Известие вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 8. С. 600-605.
6. Румянцев М.И., Ахметкужина И.Х. Модель шероховатообразования полосы в очаге деформации при холодной прокатке // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2018. № 24. С. 24-32.
7. Эспехан М., Гюнтинг Г. Передача шероховатости валков на поверхность тонкого холоднокатаного листа // Черные металлы. 1975. № 24. С. 8-14.
8. Лимарев А.С., Маркварт Т.Ю. Улучшение показателей качества поверхности автомобильного листа // Качество в обработке материалов. 2014. №2. С. 65-69.
9. Особенности натяжения полосы на различных участках стана холодной прокатки и их отображение в цифровом двойнике процесса / М.И. Румянцев, А.Н. Завалищин, А.Н. Колыбанов, К.Р. Ахмадиев // Теория и технология металлургического производства. 2022. № 1(40). С. 19-24.

10. Железнов Ю.Д., Коцарь С.Л., Абиев А.Г. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки. М.: Металлургия, 1974. 240 с.
11. Тимофеева М.А., Гарбер Э.А. Новая методика моделирования параметров трения в очаге деформации дрессировочного стана // Бюллетень «Черная металлургия». 2017. № 8. С. 60-64.
12. Повышение производительности циклов шлифования валков холодной прокатки путем оптимизации режимов графоаналитическим методом / С. М. Братан, Ю. К. Новоселов, А. О. Харченко, С. И. Рощупкин // Черные металлы. 2023. № 12. DOI: 10.17580/chm.2023.12.13. EDN JYXOPI.
13. Королев А.А. Методика определения продольной разнотолщинности при прокатке тонкой полосы // Сталь. 1971. № 9. С. 816-820.
14. Компьютерное моделирование процесса прокатки тонких полос и совершенствование конструкции продольно-клинового стана / Машеков С.А., Уразбаева Р.Е., Тукібай А.А., Тусупкалиева Э.А. // Известия КГТУ им. Раззакова. 2019. № 49. С. 125-132.
15. Горбунов А.В. Совершенствование технологии производства холоднокатаной листовой стали с требуемыми характеристиками микро топографии поверхности для автомобильной промышленности: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2011. 179 с.
16. Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Козлов А.В. Стабилизация параметров шероховатости рабочих валков дрессировочного стана в процессе холостой обкатки // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22. № 1. С. 28-34.
17. Пат. 24144973 Российская Федерация, С1. Способ производства холоднокатаного автомобильного листа / Кочнева Т.М., Лисичкина К.А., Полецков П.П., Антипанов В.Г., Крюков Д.М., Ласьков С.А. № 2009134194/02; заявл. 11.09.2009; опубл. 27.03.2011. Бюл. №9.
18. Румянцев М.И. Некоторые результаты развития и применения методологии улучшения листопрокатных технологических систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 1. С. 45-55. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55. EDN YGSAND.
4. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu., Gorbatyuk S.M., Sheshenin E.V., Ibragimov H.F. Analysis and mathematical modeling of reproduction of microgeometry of a textured roll surface on a galvanized cold-rolled strip during its tempering. *Metallurg* [Metallurgist], 2024;(2):88-94. (In Russ.)
5. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu., Ismagilov R.R. Theoretical analysis of the formation of the roughness of an automobile sheet during tempering in ballized rolls. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2019;62(8):600-605. (In Russ.)
6. Rumyantsev M. I., Akhmetkuzhina I. H. Model of strip roughness in the deformation zone during cold rolling. *Modelirovanie i razvitie processov OMD* [Modeling and development of metal pressure treatment processes], 2018;(24):24-32. (In Russ.)
7. Espehan M., Gunting D. Transfer of the roughness of the rolls to the surface of a thin cold-rolled sheet. *Chernye metally* [Ferrous metals], 1975;(24):8-14. (In Russ.)
8. Limarev A.S., Markwart T.Yu. Improving the quality indicators of the surface of an automobile sheet. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in the processing of materials], 2014;(2):65-69. (In Russ.)
9. Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N., Kolybanov A.N., Akhmediev K.R. Features of strip tension in various sections of the cold rolling mill and their display in the digital twin of the process. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical production], 2022;(1(40)):19-24. (In Russ.)
10. Zheleznov Yu.D., Kotsar S.L., Abiev A.G. *Statisticheskie issledovaniya tochnosti tonkolistovoy prokatki* [Statistical studies of the accuracy of thin-sheet rolling]. Moscow: Metallurgy, 1974, 240 p. (In Russ.)
11. Timofeeva M.A., Garber E.A. A new technique for modeling friction parameters in the deformation zone of a temper mill. *Byulleten "Chernaya metallurgiya"* [Bulletin of Ferrous Metallurgy], 2017;(8):60-64. (In Russ.)
12. Bratan S.M., Novoselov Yu.K., Kharchenko A.O., Roshchupkin S.I. Improving the productivity of grinding cycles of cold rolling rolls by optimizing modes using a graphoanalytic method. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2023;(12). DOI: 10.17580/chm.2023.12.13. (In Russ.) EDN JYXOPI.
13. Korolev A.A. Method of determining the longitudinal thickness difference when rolling a thin strip. *Stal* [Steel], 1971;(9):816-820. (In Russ.)
14. Mashekov S.A., Urazbaeva R.E., Tukibai A.A., Tusupkalieva E.A. Computer modeling of the thin strip rolling process and improvement of the design of a longitudinal wedge mill. *Izvestiya KGTU im. Razzakova* [Izvestia of KSTU named after I. Razzakov], 2019;(49):125-132. (In Russ.)
15. Gorbunov A.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva holodnokatanoy listovoy stali s trebuyemymi harakteristikami mikrotopografii poverhnosti dlya avtomobilnoy promyshlennosti: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of the production technology of cold rolled sheet steel with the required characteristics of surface microtopography for the automotive industry. Candidate dissertation]. Magnitogorsk, 2011. 179 p.

References

1. Belov V.K., Gubarev E.V. Comparison of the microtopography of an autolite produced using various technologies. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy 80-i mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current problems of modern science, technology and education. Proceedings of the 80th International Scientific and Technical Conference], Magnitogorsk, April 18-22, 2022. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2022, p. 151. (In Russ.) EDN WPYXBK.
2. Mazur V.L. The quality of thin-sheet cold-rolled steel: ensuring a given surface roughness in production conditions. *Stal* [Steel], 2018;(1):25-30. (In Russ.)
3. Mazur V.L. Scientific foundations of the production technology of rolled products with a given surface roughness. *Stal* [Steel], 2015(5):59-66. (In Russ.)

16. Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N., Kozlov A.V. Stabilization of the roughness parameters of the working rolls of the temper mill in the process of idle rolling. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Procurement production in mechanical engineering], 2024;22(1):28-34. (In Russ.)
17. Kochneva T.M., Lisichkina K.A., Poletskov P.P., Antipanov V.G., Kryukov D.M., Laskov S.A. *Sposob proizvodstva holodnokatanogo avtomobilnogo lista* [Method of production of cold-rolled automobile sheet]. Patent RF, no. 24144973 C1, 2011.
18. Rumyantsev M. I. Some results of the development and application of the methodology for improving sheet-rolled technological systems. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017;15(1):45-55. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55. (In Russ.) EDN YGSAND.

Поступила 28.05.2024; принята к публикации 10.06.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 28/05/2024; revised 10/06/2024; published 28/03/2025

Звягина Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: zviagina_mmf@mail.ru. AuthorID: 754062

Огарков Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ogarkovnikolai@mail.ru. AuthorID: 399227

Терентьев Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, профессор кафедры МиТОДиМ,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: dtterentyev@mail.ru. AuthorID: 449858

Румянцев Михаил Игоревич – доктор технических наук, профессор кафедры ТОМ,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mikhail.rumyantsev54@bk.ru. AuthorID: 423777

Elena Yu. Zvyagina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: zviagina_mmf@mail.ru. AuthorID: 754062

Nikolay N. Ogarkov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ogarkovnikolai@mail.ru. AuthorID: 399227

Dmitry V. Terentyev – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Machines and Technology
of Pressure Treatment and Mechanical Engineering,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: dtterentyev@mail.ru. AuthorID: 449858

Mikhail I. Rumyantsev – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Material Processing Technologies,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mikhail.rumyantsev54@bk.ru. AuthorID: 423777