

Грибков Э. П.
Коваленко А. К.
Ивчик Р. С.
Титенко А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАСТРОЙКИ РАБОЧИХ РОЛИКОВ НА КАЧЕСТВО ПРАВКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

Правка листов является одним из важных этапов получения качественной металлопродукции. Повышение требований к геометрическим характеристикам листопрокатной продукции определяет развитие листопрямляющих машин с точки зрения повышения эффективности процесса и расширения их возможностей для реализации правки листов из высокопрочных марок сталей. Указанное делает актуальным развитие математических моделей процесса правки для определения необходимых настроек роликов.

Основная задача математического описания процесса правки листового металлопроката заключается в определении энергосиловых параметров, необходимых для проектирования оборудования и в определении остаточной кривизны листа, необходимой для определения технологических настроек машины. В качестве методов моделирования используются численные и конечно-элементные модели. Численные модели обладают высоким быстродействием, что позволяет их использовать в автоматической системе управления. Конечно-элементные модели требуют больших затрат машинного времени на расчет [1], но позволяют получать более точные результаты с широким учетом влияния факторов на процесс.

Среди численных моделей наибольшее распространение получили различного рода решения уравнения упругой линии при представлении выправляемого металла в виде статически неопределимой многоопорной балки [2–3]. Примером использования такого подхода является модель [4] основанная на решении упругой линии методом конечных разностей, что позволило получить трехмерное представление о распределении деформаций, которые имеют различный уровень по ширине полосы. В работах [5–7] представлены модели, которые получили высокую сходимость при реализации промышленного эксперимента.

Также следует отметить численную модель процесса правки, отличительной особенностью которой является учёт таких факторов, как непрерывность эпюры углов поворота на границах расчетных участков листа, смещение точки контакта от вершины ролика по горизонтали и вертикали, влияние остаточных напряжений, возможность перехода сосредоточенного контакта в распределенный и учет напряжения металла при правке [8–9]. Данные модели ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» были успешно внедрены на ряде листопрямляющих машинах Алчевского, Челябинского, Магнитогорского металлургического комбинатов и Ашинского металлургического завода.

Одной из основных задач определения технологических настроек листопрямляющей машины (ЛПМ) является определение максимального перекрытия роликов. Однако этой проблеме уделено крайне мало внимания [1–7]. В работах по исследованию правки листового металлопроката перекрытия роликов задаются на основе опытных данных, что применимо для правки листов из материала с пределом текучести до 1000 МПа, а для материалов с более высоким пределом текучести требует дополнительных исследований.

Целью данной работы является установление критериев, влияющих на максимально допустимое перекрытие рабочих роликов ЛПМ и установление зависимостей для наиболее рациональной настройки рабочих роликов.

При решении поставленных задач в качестве целевой функции была использована численная математическая модель процесса правки [8, 9], а также ее программная реализация, которая позволяет определять энергосиловые параметры и кривизну листа после правки в зависимости от индивидуальной настройки роликов ЛПМ.

В рамках работы был разработан алгоритм математической модели, позволяющей определять необходимые для исправления продольной кривизны технологические настройки ЛПМ и сводится к определению настроечных координат каждого из подвижных роликов в зависимости от известных параметров обрабатываемого металла, геометрических параметров ЛПМ, а также допустимого значения остаточной кривизны листа после правки.

Традиционным законом настройки рабочих роликов листопрямительной машиной является линейный. В связи с использованием индивидуальной настройки рабочих роликов рациональным является исследование других законов, отличных от линейного. В этой работе были исследованы следующие законы:

- линейный;
- параболический;
- экспоненциальный;
- синусоидальный.

При этом законы для настройки роликов №№ 5; 7; 9 применительно к 11-роликовому варианту ЛПМ ($n = 11$; $d = 260$ мм; $t = 275$ мм) можно представить следующими формулами:

линейный закон

$$W(i)|_{i=5;7;9} = W(3) - \frac{(i-1)}{2} t \cdot \operatorname{tg}(\alpha); \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{W(3)}{4t}; \quad (1)$$

параболический закон

$$W(i)|_{i=5;7;9} = W(3) - a \left(\frac{i-1}{2} \right)^2; a = 0.1 \dots 0.5; \quad (2)$$

экспоненциальный закон

$$W(i)|_{i=5;7;9} = W(3) - \exp \left(a \frac{i-3}{2} \right); a = \frac{\ln(W(3))}{n-7}; \quad (3)$$

синусоидальный закон

$$W(i)|_{i=5;7;9} = W(3) - a \cdot \sin \left(b \frac{i-1}{2} \right); b = \frac{\arcsin(W(3)/a)}{n-7}; a = 10 \dots 20. \quad (4)$$

На рис. 1 представлено типовое распределение положений рабочих роликов согласно принятым зависимостям (1)...(4).

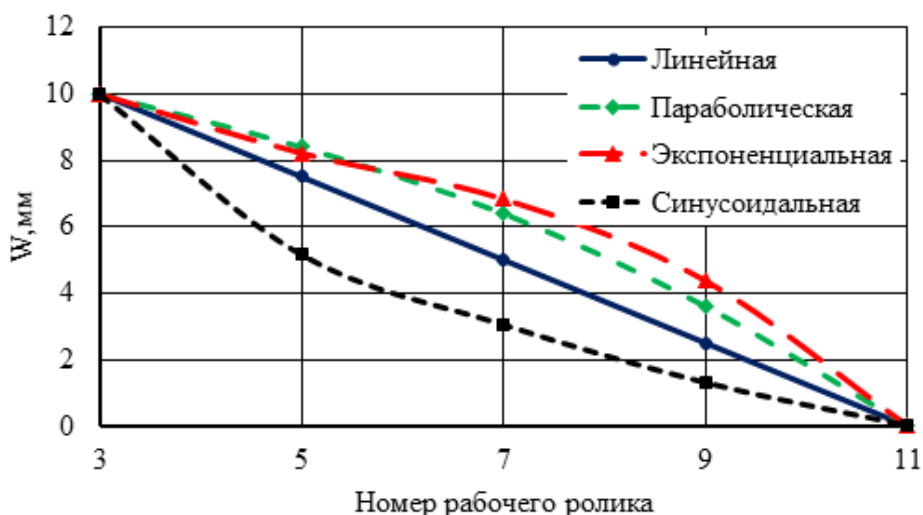


Рис. 1. Распределение положений рабочих роликов согласно зависимостям (1)...(4)

В качестве примера на рис. 2 представлены распределения конечной волнистости листа (мм/м) при реализации различных законов настройки роликов. Как видно из анализа полученных зависимостей, наибольшая плоскостность проката получается при линейной и синусоидальной настройке.

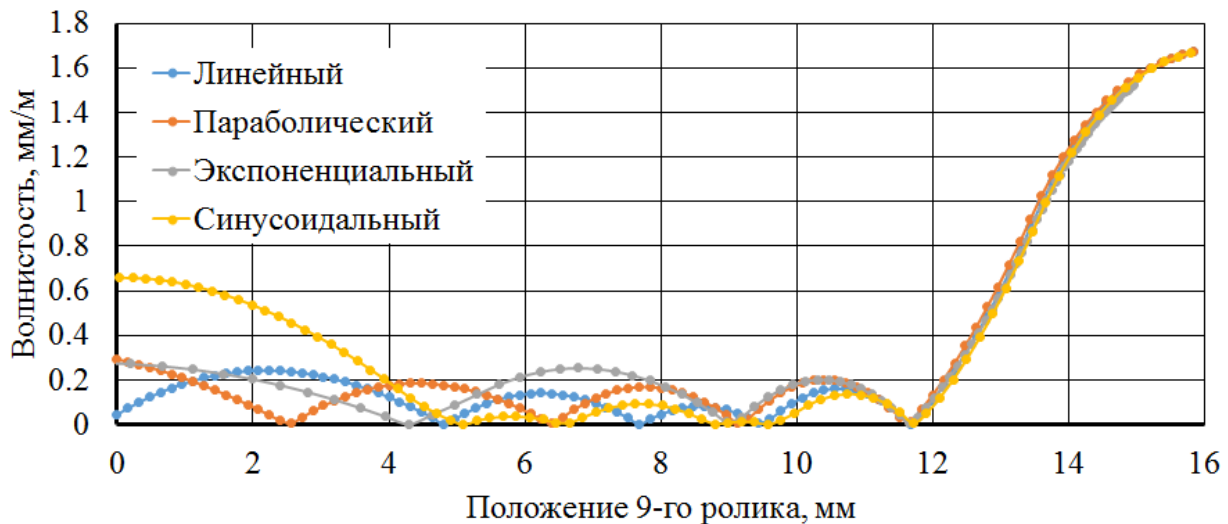


Рис. 2. Распределение конечной волнистости листа (мм/м) при реализации различных настроек ЛПМ по законам (1)...(4) ($h = 2$ мм; $\sigma_s = 760$ МПа; $n = 11$; $d = 260$ мм; $t = 275$ мм)

Аналогичные расчеты были проведены для листа толщиной 6 мм (рис. 3), анализ которых подтверждает бóльшую эффективность линейной и синусоидальной настройки роликов. При этом следует учесть, что в случае правки листа толщиной 2 мм (см. рис. 2) уровень необходимой пластификации (больше 80 %) достигается при перекрытии третьего ролика свыше 8 мм, а в случае правки листа толщиной 6 мм (см. рис. 3) – свыше 10 мм.

Следовательно более рациональной является стратегия определения положения рабочих роликов, основанная на линейном и синусоидальном законах.

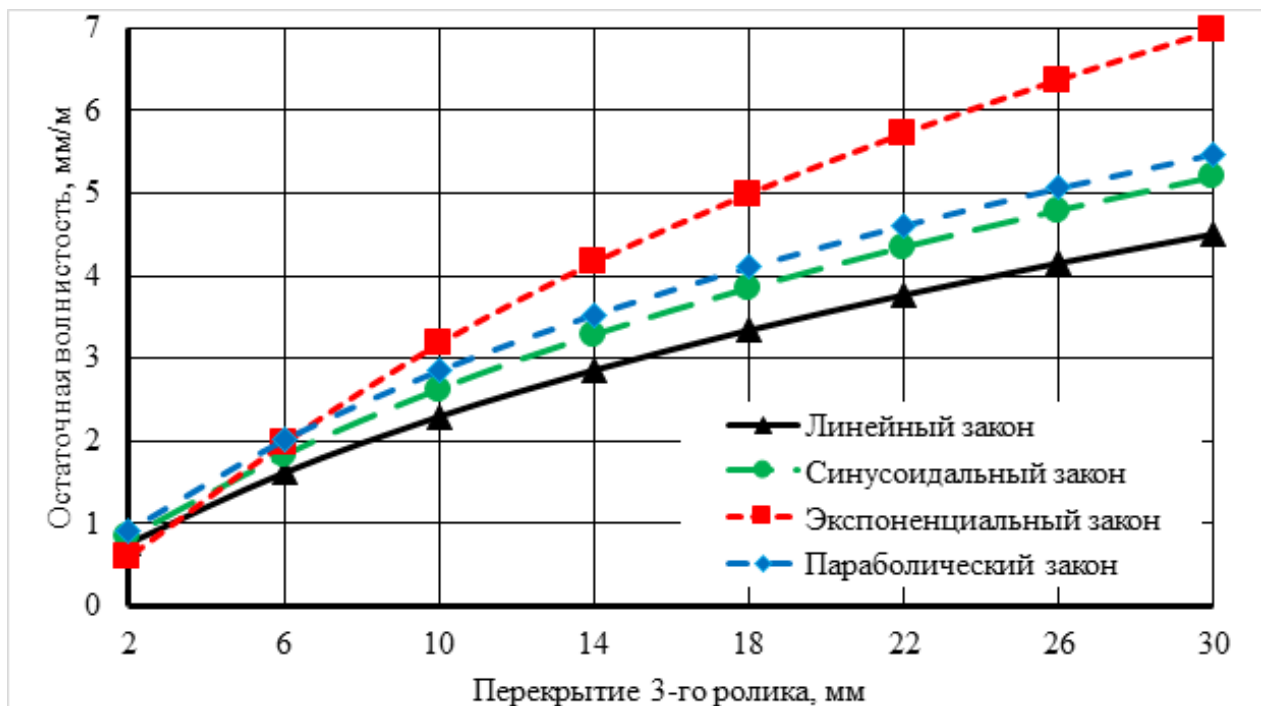


Рис. 3. Зависимость остаточной кривизны (а) и волнистости (б) от перекрытия на 3-м ролике для различных законов установки роликов ЛПМ ($h = 6$ мм; $\sigma_s = 760$ МПа; $n = 11$; $d = 260$ мм; $t = 275$ мм)

Помимо определения рационального закона для положения рабочих роликов необходимо также учитывать выполнение условия захвата металла роликом и условия прочности рабочих и опорных роликов. Для этого было выполнено исследование по влиянию перекрытия на третьем ролике на качество правки.

Перекрытие на третьем ролике определяется задаваемым коэффициентом проникновения пластической деформации K :

$$f_{\max} = \frac{\sigma_s \cdot t^2}{K \cdot E \cdot h}, \quad (5)$$

где σ_s – предел текучести обрабатываемого материала; t – шаг роликов; E – модуль упругости обрабатываемого материала; h – толщина листа.

Из опыта холодной правки листов на ЛПМ Ашинского металлургического завода были определены рациональные значения этого коэффициента [9]:

$$K = 2.5 \dots 3.6 \text{ при } h < 20 \text{ мм};$$

$$K = 3.0 \dots 4.0 \text{ при } h \geq 20 \text{ мм}.$$

Для определения качества правки листа в разработанной математической модели используется параметр остаточной относительной кривизны:

$$\chi_{\text{ост}} = \frac{1}{R_{\text{ост}}}. \quad (6)$$

Согласно стандартам показатель качества правки (плоскостность) листов определяется амплитудой волны на базе (1 метр согласно ГОСТ). Перевести один показатель в другой можно по следующей зависимости:

$$A_{\text{ост}} = \frac{1}{\chi_{\text{ост}}} - \sqrt{\left(\frac{1}{\chi_{\text{ост}}}\right)^2 - \frac{L_6^2}{4}}, \quad (7)$$

где L_6 – база, на которой определяется волнистость.

В качестве примера реализации разработанного алгоритма на рис. 4 представлены распределения остаточной относительной кривизны и амплитуды волнистости для различной настройки 3-го ролика $W(3)$ и угла наклона образующей роликов верхней кассеты. Результаты приведены для 11-роликового варианта ЛПМ для материала с пределом текучести 760 МПа.

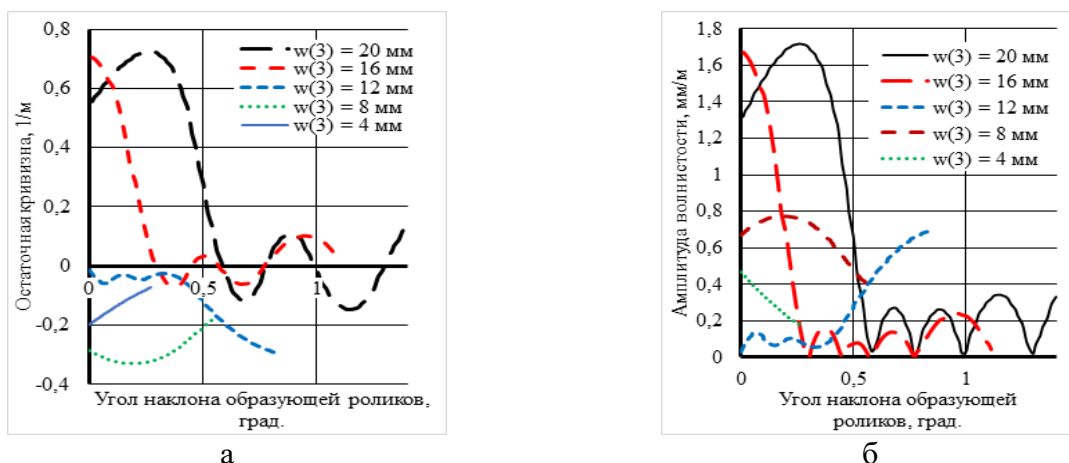


Рис. 4. Зависимость остаточной кривизны (а) и волнистости (б) от перекрытия на 3-м ролике для различного угла образующей роликов верхней кассеты для листа толщиной 2 мм ($h = 2$ мм; $\sigma_s = 760$ МПа; $n = 11$; $d = 260$ мм; $t = 275$ мм)

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод о влиянии перекрытия на 3-м ролике (уровня пластификации) на качество правки, что свидетельствует о необходимости определения его оптимального значения.

$$W_{\max} = 43.898 h^{-0.2177} \quad (8)$$

Помимо условия захвата также было исследовано распределение максимально возможных перекрытий из условия обеспечения прочности рабочих и опорных роликов. Данное условие выражено через максимальную силу правки. Для решения этой задачи был использован метод конечных элементов в среде Abaqus CAE. Результаты были получены для многороликовой листопрямляющей машины конструкции Новокраматорского машиностроительного завода, которая имеет три варианта исполнения: 11-, 9- и 5-роликовый варианты с ограничением сортамента по толщине и пределу текучести для каждого из исполнений. Для расчета были выбраны максимальные значения предела текучести для каждой толщины. Результаты расчета представлены на рис. 5.

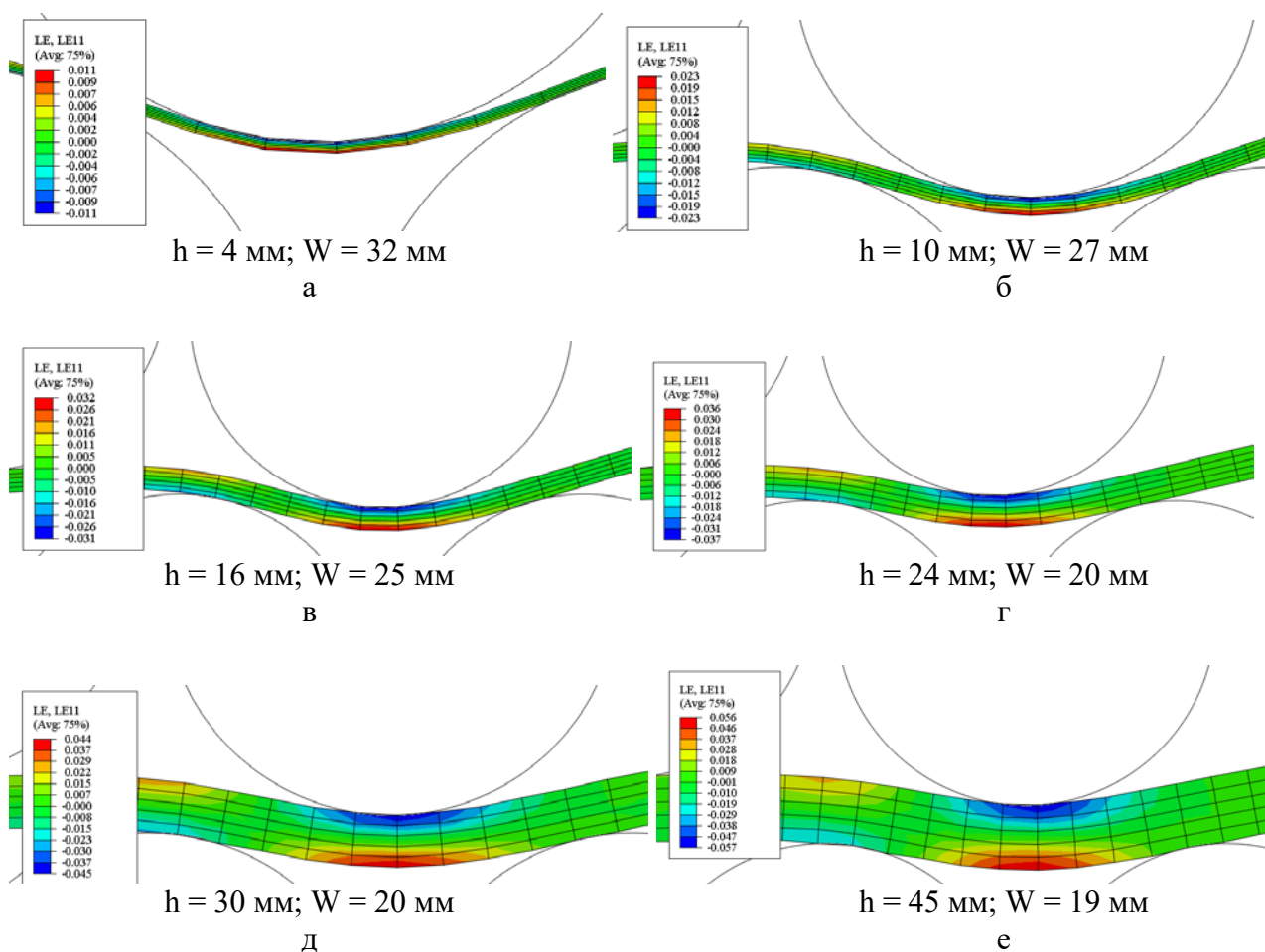


Рис. 5. Распределение полей логарифмических деформаций при максимально возможном захвате листов

На рис. 6 представлены расчетные зависимости, показывающие предельные возможности ЛПМ при максимально возможных для данной толщины пределах текучести и ширине. Из анализа полученных зависимостей можно сделать вывод о влиянии на предельное перекрытие роликов условия захвата при толщинах меньше 6 мм и условия прочности при больших толщинах проката. При пределах текучести меньших максимально допустимых или ширине листа меньше максимальной (в данном случае – 2600 мм) зависимость по условию прочности будет иметь другой вид и при определенных условиях ограничивающим фактором может быть условие захвата. Данные зависимости могут быть использованы в качестве граничных условий при определении технологических настроек ЛПМ, а также при проектировании ЛПМ новых конструкций.

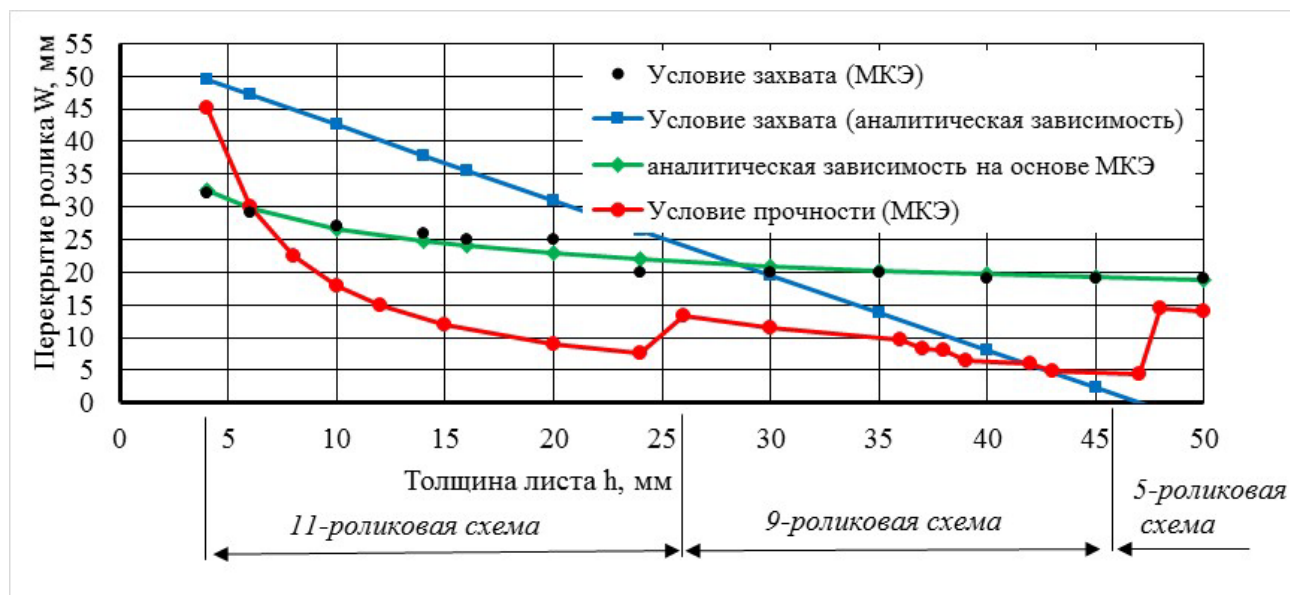


Рис. 6. Результаты расчета предельно возможных перекрытий рабочих роликов от толщины листа при максимально возможном значении предела текучести для ЛПМ конструкции НКМЗ

ВЫВОДЫ

В результате исследования влияния настройки рабочих роликов на качество листового металлопроката при правке на многороликовой правильной машине были установлены законы для рационального позиционирования роликов. В качестве оптимальных были выявлены линейный и синусоидальный законы расположения рабочих роликов при их индивидуальной настройке. Также были установлены граничные факторы, влияющие на максимальное перекрытие роликов. К таким факторам были отнесены условие захвата и условие прочности роликов. Условия захвата были проанализированы на основе известной аналитической зависимости, основанной на геометрическом решении задачи и на основе результатов конечно-элементного моделирования. По результатам последней была предложена зависимость для формулировки данного условия применительно к анализируемой конструкции листопрямильной машины. На примере реализации разработанной конечно-элементной модели процесса правки листов применительно к листопрямильной машине конструкции ПАО «НКМЗ» было установлено, что доминирующим влиянием при правке листов толщиной менее 6 мм обладает условие захвата металла роликами, а при больших толщинах – условие прочности рабочих роликов. При снижении предела текучести материала или ширины листов это соотношение будет перераспределено в сторону условия захвата. Полученные зависимости могут быть использованы в качестве граничных условий при определении технологических настроек многороликовой листопрямильной машины (ЛПМ), а также при проектировании ЛПМ новых конструкций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mathieu N., Dimitriou R., Parrico A., Potier-Ferry M., Zahrouni H. Flatness defects after bridle rolls: a numerical analysis of leveling. *International Journal of Material Forming*. 2013, vol. 6, no. 2, pp. 255–266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-011-1083-2>
2. Недорезов И. В., Орлов Б. Я., Винокурский А. Х. Роликовые правильные машины АО «Уралмаш» и пути их совершенствования. *Труды первого Конгресса прокатчиков*. Магнитогорск, 23-27 октября, 1995. Москва, 1996. С. 38–42.
3. Луговской В. М. Теория расчета листопрямильных машин и автоматизация их проектирования. *Труды ВНИИМЕТМАШ*. Москва: Металлургия. 1970. № 26. С. 8–30.
4. Шинкин В. Н. Расчет технологических параметров правки стального листа на одиннадцатироликовой листопрямильной машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate. *Производство проката*. 2014. № 8. С. 26–34.

5. Park K., Hwang S. Development of a Finite Element Analysis Program for Roller Leveling and Application for Removing Blanking Bow Defects of Thin Steel Sheet. *ISIJ International*. 2002, vol. 42, no. 9, pp. 990–999. DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.42.990>
6. Cui L., Hu X., Liu X. Analysis of Leveling Strategy for a plate Mill. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 145, pp. 424–428. DOI: <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>
7. Cui L., Hu X., Liu X. Research on Mathematical Model of Leveling Process for Plate Mill. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 148–149, pp. 368–371. DOI: <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.368>
8. Сатонин А. В., Грибков Э. П., Гаврильченко О. А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла и основных показателей качества при реализации процесса правки на многороликовых правильных машинах. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. Краматорськ : ДДМА. 2010. № 1 (18). С. 268–273.
9. Федоринов В. А., Барабаш А. В., Гаврильченко Е. Ю., Грибков Э. П. Математическая модель технологических настроек ЛПМ ТЛС 2850 Ашинского металлургического завода для горячей и холодной правки листов. *Обработка материалов давлением*: сб. науч. тр. Краматорск: ДГМА, 2014. № 1 (38). С. 48–53.

REFERENCES

1. Mathieu N., Dimitriou R., Parrico A., Potier-Ferry M., Zahrouni H. Flatness defects after bridge rolls: a numerical analysis of leveling. *International Journal of Material Forming*. 2013, vol. 6, no. 2, pp. 255–266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-011-1083-2>
2. Nedorezov I. V., Orlov B. Ya., Vinokursky A. Kh. Roller straightening machines of JSC "Uralmash" and ways to improve them. *Proceedings of the First Congress of Distributors*. Magnitogorsk, October 23-27, 1995. M., 1996. pp. 38–42 (in Russian).
3. Lugovskoy V.M. Theory of calculating sheet straightening machines and automation of their design. *Proceedings of VNIIMETMASH*. Moscow: Metallurgy. 1970. no. 26. pp. 8–30 (in Russian).
4. Shinkin V.N. Calculation of technological parameters for straightening steel sheet on an eleven-roll straightening machine of a cut-to-length line by Fagor Arrasate. *Production of rolled products*. 2014. no. 8. pp. 26–34 (in Russian).
5. Park K., Hwang S. Development of a Finite Element Analysis Program for Roller Leveling and Application for Removing Blanking Bow Defects of Thin Steel Sheet. *ISIJ International*. 2002, vol. 42, no. 9, pp. 990–999. DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.42.990>
6. Cui L., Hu X., Liu X. Analysis of Leveling Strategy for a plate Mill. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 145, pp. 424–428. DOI: <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>
7. Cui L., Hu X., Liu X. Research on Mathematical Model of Leveling Process for Plate Mill. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 148–149, pp. 368–371. DOI: <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.368>
8. Satonin A.V., Gribkov E.P., Gavrilchenko O.A. Mathematical modeling of the stress-strain state of metal and the main quality indicators during the implementation of the straightening process on multi-roll straightening machines. *Herald of the DSEA*. Kramatorsk: DSEA. 2010. No. 1 (18). pp. 268–273 (in Russian).
9. Fedorin V.A., Barabash A.V., Gavrilchenko E.Yu., Gribkov E.P. Mathematical model of technological settings of plate mill 2850 leveler of Ashinskiy metallurgical plant for hot and cold straightening of sheets. *Materials working by pressure*. Kramatorsk: DSEA, 2014. no. 1 (38). pp. 48–53 (in Russian).

- Грибков Э. П. – д-р. техн. наук, доц. ДГМА;
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua; <https://orcid.org/0000-0002-1565-6294>
- Коваленко А. К. – ассистент каф. КИТ ДГМА;
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua; <https://orcid.org/0000-0003-3379-2000>
- Ивчик Р. С. – вед. конструктор ЧАО «НКМЗ»;
E-mail: bhps@nkmz.donetsk.ua; <https://orcid.org/0000-0002-2796-7559>
- Титенко А. А. – студент ДГМА;
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua; <https://orcid.org/0000-0003-4560-5292>

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ПАО «НКМЗ» – Приватное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск.