

УДК 621.771.01

Э.П. ГРИБКОВ

Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

Е.Ю. ГАВРИЛЬЧЕНКО

ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ ВОЛНИСТОСТИ ЛИСТОВ НА ЛИСТОПРАВИЛЬНЫХ МАШИНАХ

Предложена конечно-элементная трехмерная модель процесса правки волнистости листов. Проанализировано влияние перекрытия и изгибов рабочих роликов на величину конечной волнистости листов. Установлено, что уровень изгиба и перекрытия рабочих роликов увеличивает эффективность правки волнистости. Предложенная конечно-элементная модель может быть использована для определения оптимальных настроек рабочих роликов правильной машины.

Ключевые слова: листопрямительная машина, правка листов, конечно-элементная модель, волнистость проката, рабочие ролики, технологические настройки.

E.P. GRIBKOV

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

E.Yu. GAVRIL'CHENKO

ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», м. Краматорськ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРАВКИ ХВИЛЯСТОСТІ ЛИСТІВ НА ЛИСТОПРАВИЛЬНИХ МАШИНАХ

Запропоновано скінчено-елементну тривимірну модель процесу правки хвилястості листів. Проаналізовано вплив перекриття і вигинів робочих роликів на величину кінцевої хвилястості листів. Встановлено, що рівень вигину та перекриття робочих роликів збільшує ефективність правки хвилястості. Запропонована скінчено-елементна модель може бути використана для визначення оптимальних налаштувань робочих роликів правильної машини.

Ключові слова: листопрямительна машина, правка листів, скінчено-елементна модель, хвилястість прокату, робочі ролики, технологічні налаштування.

E.P. GRIBKOV

Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk

E.Yu. GAVRIL'CHENKO

PJSC "Novokramatorsky Mashinostroitelny Zavod", Kramatorsk

RESEARCH OF WAVY SHEETS LEVELLING TO THE LEVELERS

Increasing requirements for the flatness of sheet metal makes it relevant to the empowerment levelers by introducing methods of editing both the longitudinal and transverse curvature of the sheets. The paper presents a three-dimensional finite element model of the process straightening wavy sheets. The influence of the overlapping and bending working rollers at the limit of wavy sheets. Established that the level bending and overlapping working rollers increases efficiency straightening waviness. The quantitative characteristics for straightening sheet thickness of 10 mm. The proposed finite element model can be used to determine the optimal configuration of working rolls of the leveler.

Keywords: levelers, straightening, finite element model, wavy sheets, work rollers, technological settings.

Постановка проблеми

Правка листов является одним из важных этапов получения качественной металлопродукции. Повышение требований к геометрическим характеристикам листопрокатной продукции определяет развитие листопрямительных машин с точки зрения повышения эффективности процесса и расширения их возможностей для реализации правки не только продольной кривизны, но и волнистости, что возможно при использовании изгиба рабочих роликов [1]. Указанное делает актуальным развитие математических моделей процесса правки для определения необходимых настроек роликов.

Анализ последних исследований и публикаций

Основная задача математического описания процесса правки листового металла 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, 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. Примером использования такого подхода является модель [2] основанная на решении упругой линии методом конечных разностей, что позволило получить трехмерное представление о распределении деформаций, которые имеют различный уровень по ширине полосы.

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 [3-5]. Данные модели ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» были успешно внедрены на ряде листоправильных машин Алчевского, Челябинского, Магнитогорского металлургического комбинатов и Ашинского металлургического завода.

Для сравнения разных методов моделирования в работе [6] разработаны одномерная численная и двумерная конечно-элементные модели, которые подтверждены экспериментально. Показана достаточная сходимость результатов для силы правки и деформаций, в то время как моменты определены с высокой погрешностью, не смотря на более точное описание механических свойств материала в конечно-элементной модели.

В работе [7] рассмотрена конечно-элементная модель правки алюминиевых полос в тянущих роликах. Показано, что дефект волнистости можно устранить путем профилирования роликов для удлинения коротких продольных волокон.

J. Petruška [8] на основе метода конечных элементов в программной оболочке MatLab предложил двумерную математическую модель для определения кривизны листов и выбора рациональных настроек правильной машины. Данный подход сочетает точность метода конечных элементов и быстродействие численного моделирования, но требует довольно сложного описания модели.

Во всех работах, посвященных моделированию правки листов отмечается преимущественное влияние свойств материала на протекание процесса. В работах [9-10] показана важность учета не только механических свойств материала, но и проявление эффекта Баушингера.

Существующие модели процесса правки листового проката не учитывают влияние изгиба рабочих роликов на распределение деформации по ширине листа и, как следствие, исправление дефекта волнистости. Это делает актуальным дальнейшее развитие математических моделей с представлением деформируемого металла в трехмерном пространстве и последующим анализом влияния технологических настроек рабочих роликов на плоскостность выправляемого проката.

Формулировка цели исследований

Целью данной работы является определение влияния величины изгиба и перекрытия рабочих роликов листоправильной машины на исправление дефекта волнистости листов.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- создание трехмерной модели процесса правки листового проката на основе использования метода конечных элементов;
- экспериментальное подтверждение разработанной модели;
- на основе реализации разработанной конечно-элементной модели установить влияние технологических настроек роликов на исправление дефекта волнистости листов.

Изложение основного материала

В рамках анализа напряженно-деформированного состояния металла при правке продольной и поперечной кривизны листов был выполнен расчет с использованием метода конечных элементов в системе Abaqus.

Рассматриваемая применительно к анализу процесса правки листов на правильных машинах расчетная схема, которая представляла собой деформируемый лист 4, три рабочих 1-3 и два 5, 6 направляющих ролика, представлена на рис. 1, а.

При исследовании использовалась плоскость симметрии, что позволило сократить время расчёта. Для моделирования роликов были использованы трехмерные недеформируемые элементы. Для моделирования листа были использованы элементы типа C3D8R – восьмиузловые линейные, твердотельные редуцированные элементы с контролем разрушения.

В соответствии с расчетной схемой (рис. 1, а) шаг машины t был принят 250 мм, диаметр рабочих роликов 1, 2, 3 равным 220 мм. Непосредственно моделирование процесса правки было выполнено для листа толщиной 10 мм. Для моделирования изгиба оси рабочих роликов их бочка была

выполнена выпуклой. Для исследования процесса правки краевой волнистости использовали модель листа, полученную в пакете SolidWorks (рис. 2).

Исходная конечно-элементная модель имеет следующие граничные условия: нижние ролики машины 1 и 2, а также направляющие ролики 5 и 6 (рис. 1, а) имеют одну вращательную степень свободы, ролик 3 имеет две степени свободы, возможность вращения вокруг своей оси, а также перемещения по оси «2» глобальной системы координат.

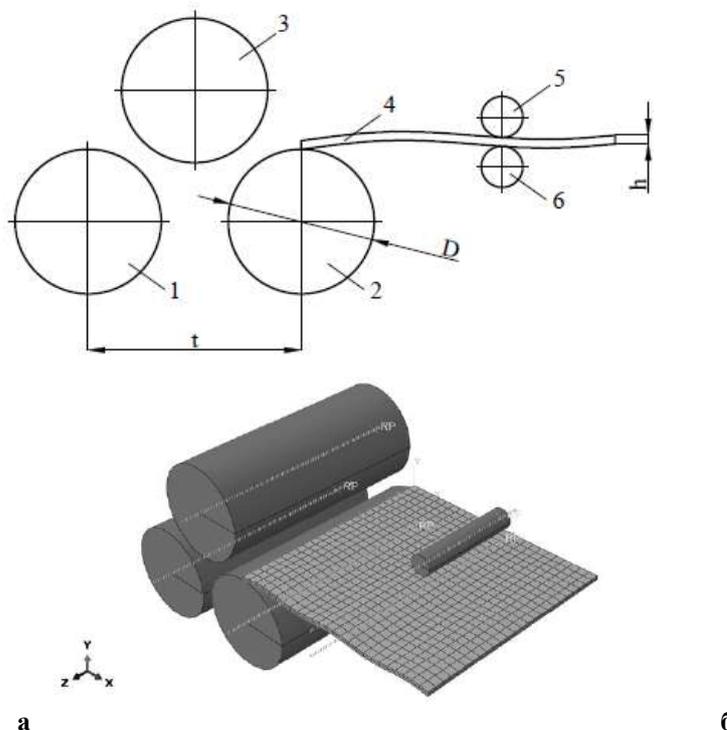


Рис. 1. Расчётная (а) и конечно-элементная в глобальной системе координат (б) модель процесса правки листов на листопрямляющих машинах: 1-3 – рабочие ролики; 4 – лист; 5, 6 – направляющие ролики

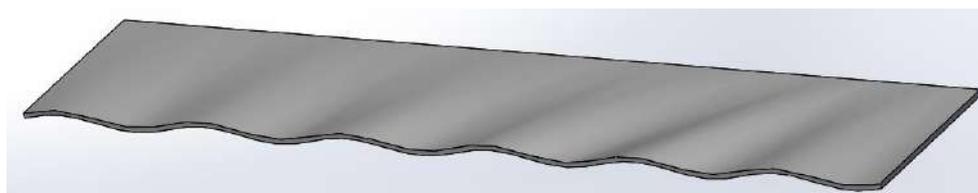


Рис. 2. Модель листа с краевой волнистостью

В расчете использовалась модель классической пластичности металла, в качестве материала листа была принята сталь 08кп. Контакт между листом и роликами задавался при помощи модели контакта «Поверхность к поверхности» путем задания коэффициента трения равным 0,1. Все 3 рабочих ролика, а также два направляющих приводились во вращение с угловой скоростью 0,95 и 4 рад/сек соответственно, что, с учетом их диаметра, соответствует примерной скорости движения листа вдоль оси «1» глобальной системы координат равной 0,1 м/с.

Для оценки полученных результатов в данном случае выходными параметрами были выбраны проекции реакций в контрольных точках роликов в глобальной системе координат, а также перемещения, деформации и напряжения в узлах конечных элементов листа.

Результаты исследований

Расчеты были произведены для различных перекрытий и различного изгиба бочки роликов. На рис. 3 представлены поля распределения эквивалентных деформаций по поверхности листа при различных перекрытиях (а-г) и изгибов рабочих роликов (д-е).

Из анализа представленных распределений видно, что с увеличением величины перекрытия роликов W (рис. 4, а-г) эквивалентная деформация в средней части листа (плоский участок) возрастает, а

характер распределения определяется положением волнистостью боковых кромок. В частности при увеличении перекрытия с 3 до 10 мм максимальное значение эквивалентной деформации возросло в 2 раза – с 3% до 6%. При возрастании величины изгиба рабочего ролика dW также наблюдается увеличение эквивалентной деформации в средней части листа (плоский участок). При отсутствии изгиба ролика (рис. 3, д) наблюдается относительно равномерное распределение деформации по поверхности листа на уровне 3,5%. При возрастании изгиба ролика деформация средних участков листа увеличивается (рис. 3, г, е) и при величине изгиба 2 мм находится на уровне 6,0%, а при величине изгиба 5 мм – на уровне 6,5%, причем зона деформации возрастает.

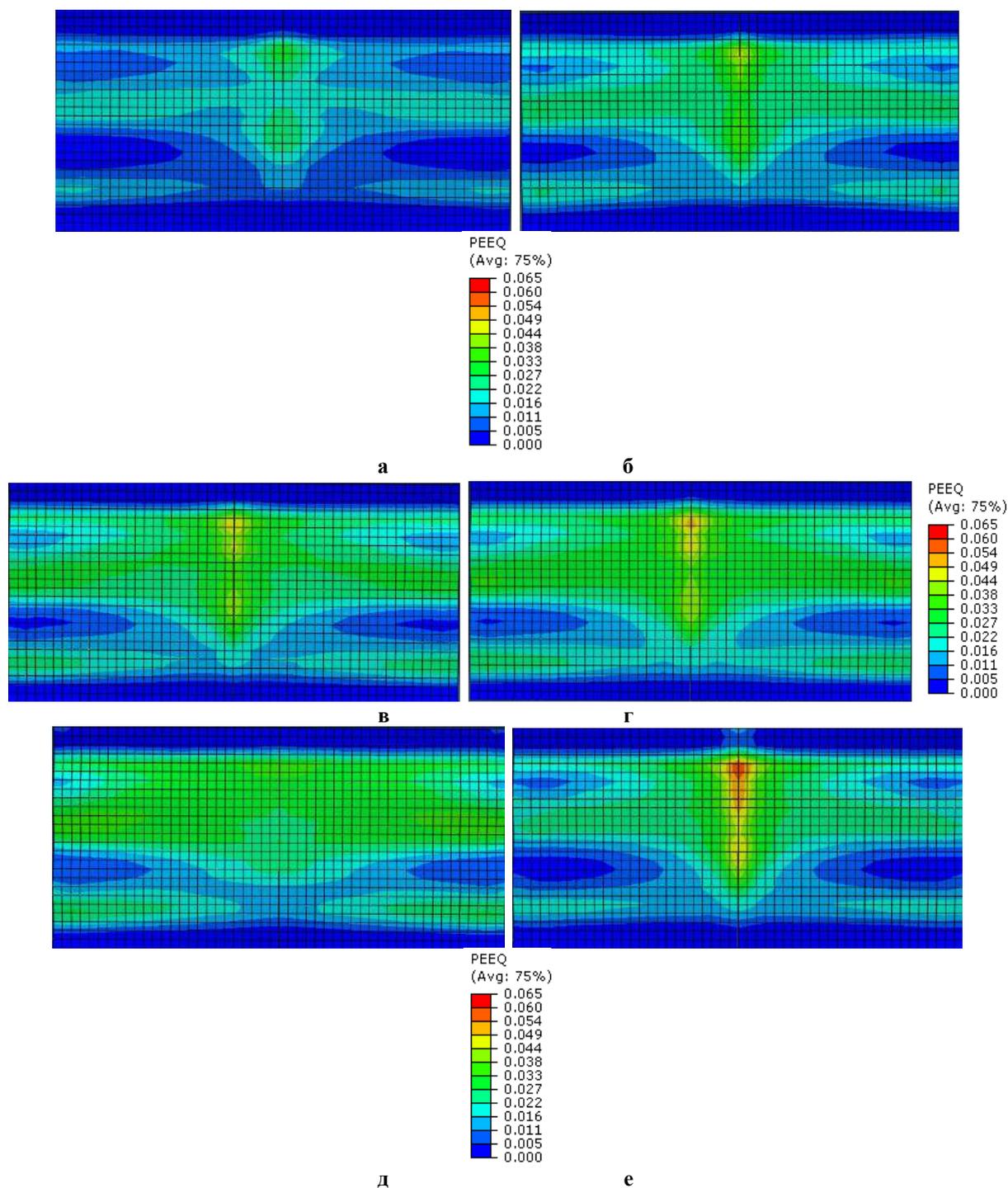


Рис. 3. Поля распределения эквивалентных деформаций по поверхности листов при различных перекрытиях W (а-г) и изгибах dW (д, е) рабочих роликов:
 а – $W=3$ мм, $dW=2$ мм; б – $W=7$ мм, $dW=2$ мм; в – $W=9$ мм, $dW=2$ мм; г – $W=10$ мм, $dW=2$ мм;
 д – $W=10$ мм, $dW=0$ мм; е – $W=10$ мм, $dW=5$ мм

На рис. 4 представленны расчетные распределения продольной деформации по нижней поверхности листов при различных изгибах рабочих роликов. Из анализа данных распределений можно сделать вывод, что при правке листов с краевой волнистостью наблюдаются чередования деформации сжатия и растяжения по длине листа. При этом при увеличении изгиба ролика повышается разница деформации средних и крайних участков листов. На рис. 6 представлены расчетные распределения краевой волнистости листов в зависимости от величины изгиба роликов dW . В связи с большими затратами машинного времени на расчет был рассмотрен лист длиной, равной двойному шагу правильной машины, что привело к некоторому искажению данного результата по первой и третьей волне из-за неполной обработки переднего и заднего конца полосы.

Из анализа, представленного на рис. 5 распределения видно, что с увеличением изгиба ролика краевая волнистость уменьшается. В частности, при отсутствии изгиба высота волны уменьшилась с 4,0 мм до 3,65 мм, при изгибе 1 мм – до 2,8 мм, при изгибе 2 мм – до 1,04 мм, при изгибе 5 мм – до 0,52 мм (рис. 5). Данный факт подтверждает влияние величины изгиба ролика на исправление волнистости листов и возможность использования данного подхода для повышения качества правки листов.

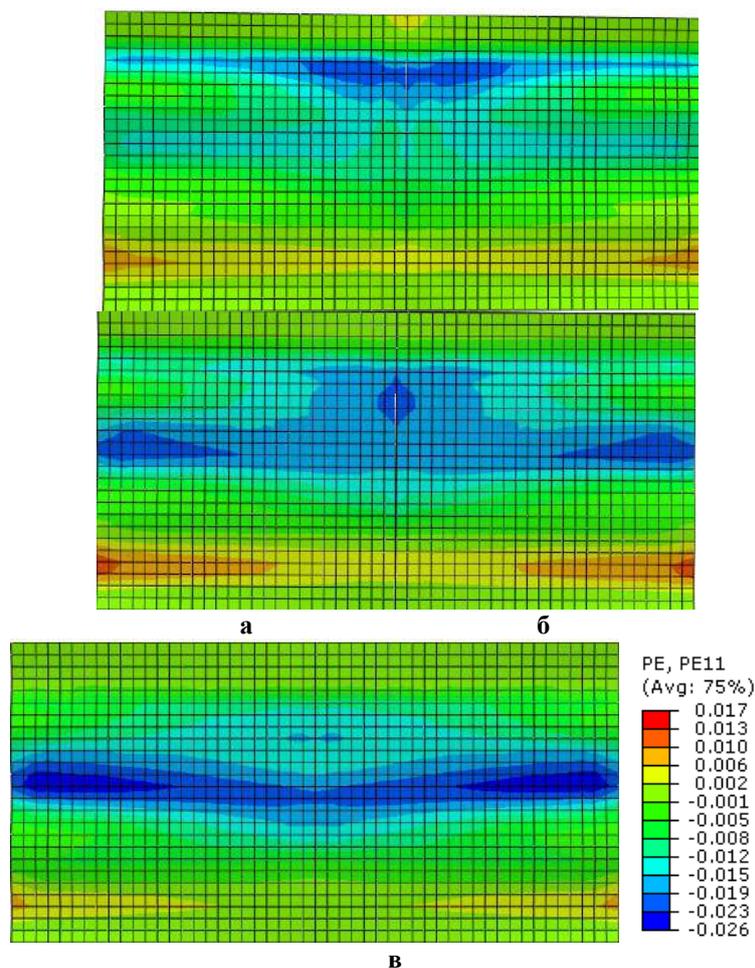


Рис. 4. Распределения продольной деформации на контактной поверхности листов в зависимости от величины изгиба рабочих роликов:

а – $W=10$ мм, $dW=5$ мм; б – $W=10$ мм, $dW=2$ мм; в – $W=10$ мм, $dW=0$ мм

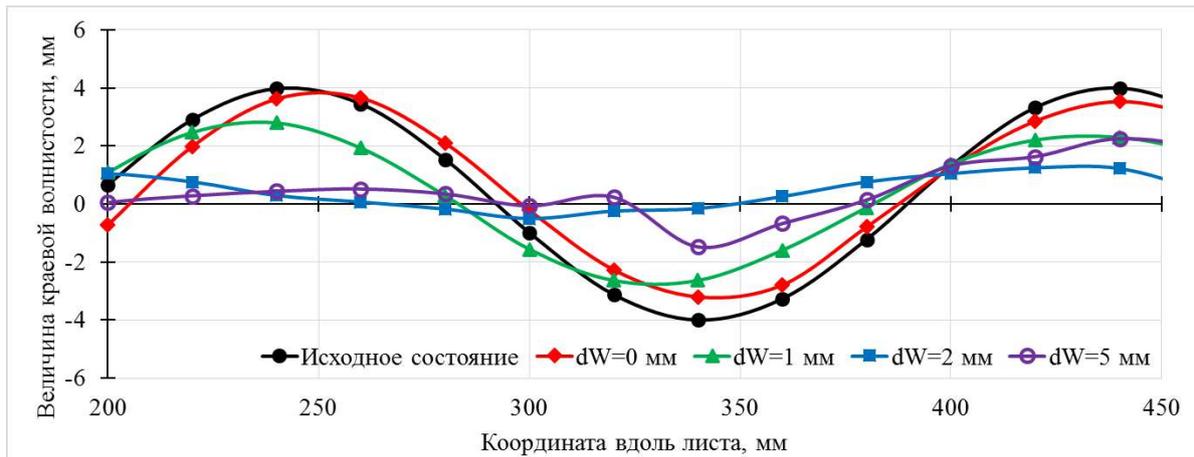


Рис. 5. Распределение краевой волнистости листов до и после правки при различных изгибах рабочих роликов

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проведены с целью оценки степени достоверности конечно-элементной модели процесса правки на листоправильных машинах с дифференцируемым приложением силы правки по ширине полосы. Исследования проведены с использованием лабораторной экспериментальной установки правильной машины 7x100/105 (рис. 6) [11]. Для упрощения схемы проведения эксперимента для имитации изгиба третий рабочий ролик был выполнен выпуклым с величиной dW равной 4 мм. (рис. 7).



Рис. 6. Общий вид лабораторной экспериментальной установки с дифференцированным приложением силы правки по ширине полосы



Рис. 7. Роликовая система листоправильной машины с 3-им роликом бочкообразной формы для имитации изгиба по центру

При проведении экспериментальных исследований в качестве образца использовали стальной лист размером $2,5 \times 150 \times 900$ мм (рис. 8).



Рис. 8. Общий вид стального листа, используемого при экспериментальном исследовании на листопрямительной машине

Перекрытие третьего ролика составило 2,5 мм, в то время как остальные были установлены на толщину проката, что не позволило убрать в полной мере продольную кривизну листа, но позволило устранить их влияние на изменение волнистости.

Так как удлинение волокон в центральной части стальных листов при правке с бочкообразным валком на базе 900 мм не превышает 1 мм, для большей наглядности исправления дефекта, на кромке полосы механическим способом была получена исходная волнистость с амплитудой $A=4$ мм (рис. 8).

Правку листов проводили за три прохода без изменения настройки роликов. Типовые примеры осциллографических распределений сил и моментов на третьем рабочем ролике представлены на рис. 9, а изменение амплитуды волнистости после каждого прохода – на рис. 10.

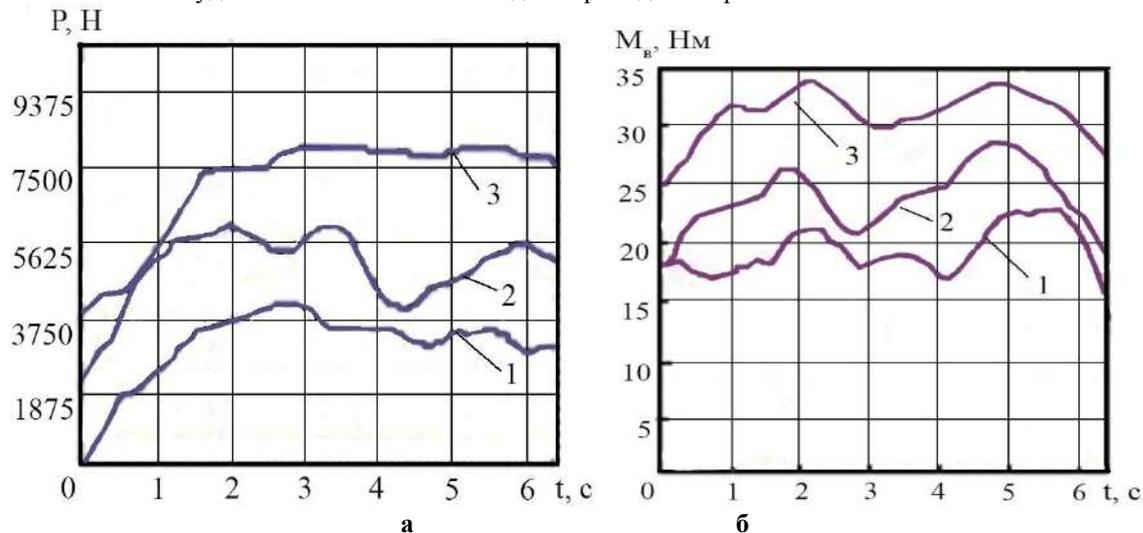


Рис. 9. Распределение силы (а) и момента (б) правки при экспериментальных исследованиях: 1 – первый проход; 2 – второй проход; 3 – третий проход

Для сравнения результатов теоретического и экспериментального исследований была разработана на описанном выше принципе применительно к условиям опыта конечно-элементная модель правки листов, расчетная схема которой представлена на рис. 11.

Количество, шаг, диаметр и настройки роликов соответствовали экспериментальной установке. Третий ролик – с выпуклой бочкой, величина перепада диаметров – 4 мм. Полоса смоделирована в среде SolidWorks и импортирована в Abaqus.

Результаты расчета энергосиловых параметров представлены на рис. 12, а вид деформированной заготовки после правки – на рис. 13. Замеры величины волнистости определяли по расстоянию между центральными и краевыми волокнами, а силу правки – по величине реакции на оси третьего ролика.

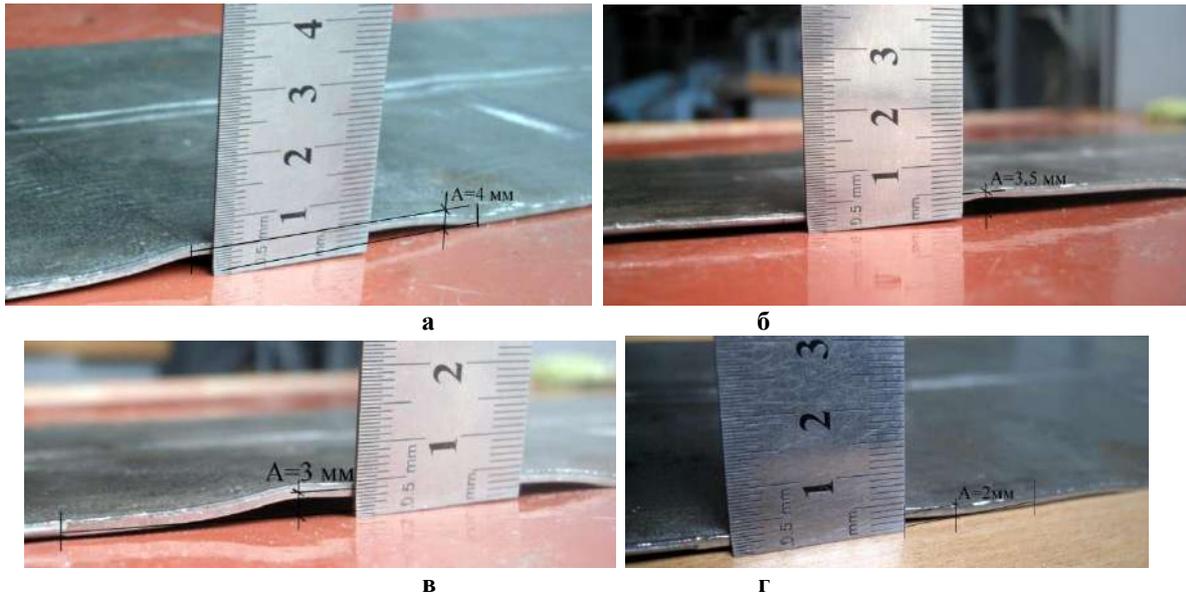


Рис. 10. Изменение амплитуды волнистости на кромках полосы: а – исходная волнистость; б – волнистость после 1 прохода; в – после 2 прохода; г – после 3 прохода

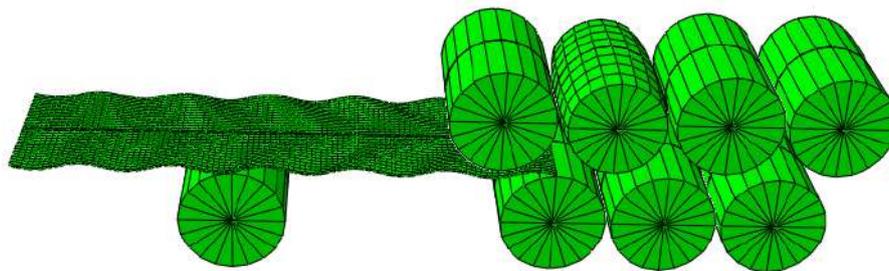


Рис. 11. Расчетная схема конечной-элементной модели, адаптированной к условиям проведения экспериментальных исследований

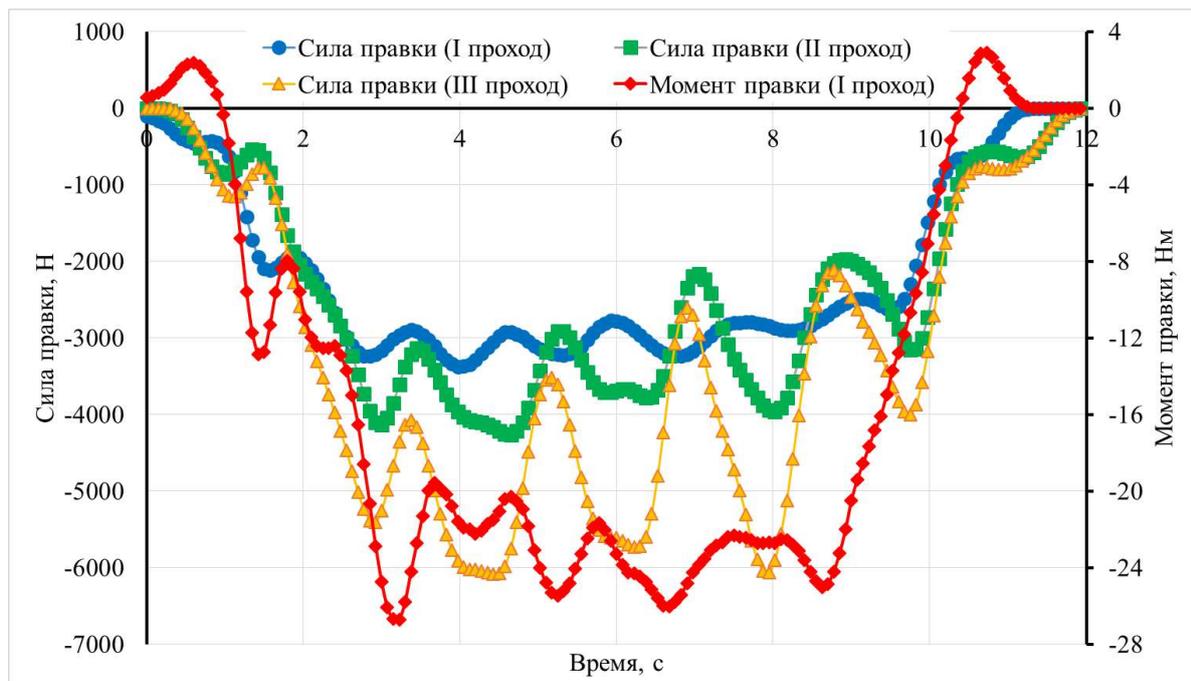


Рис. 12. Расчетные распределения силы правки в условиях экспериментальных исследований

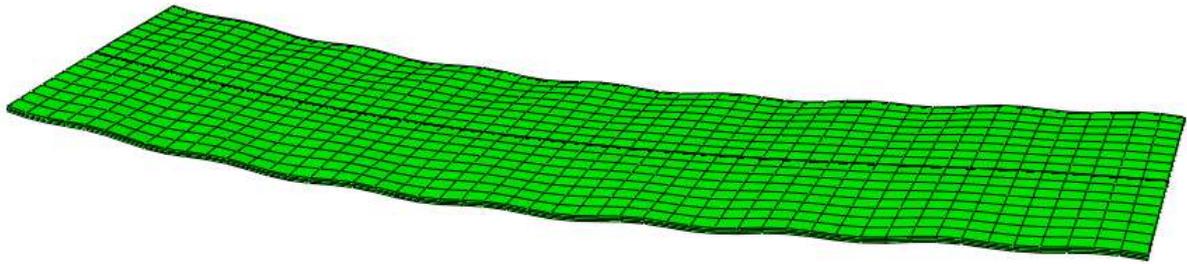


Рис. 13. Вид деформированной заготовки после правки

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований приведены на рис. 14, из анализа которых видно, что погрешность модели не превысила 11,8% по величине волнистости листов и 36% – по силе правки.

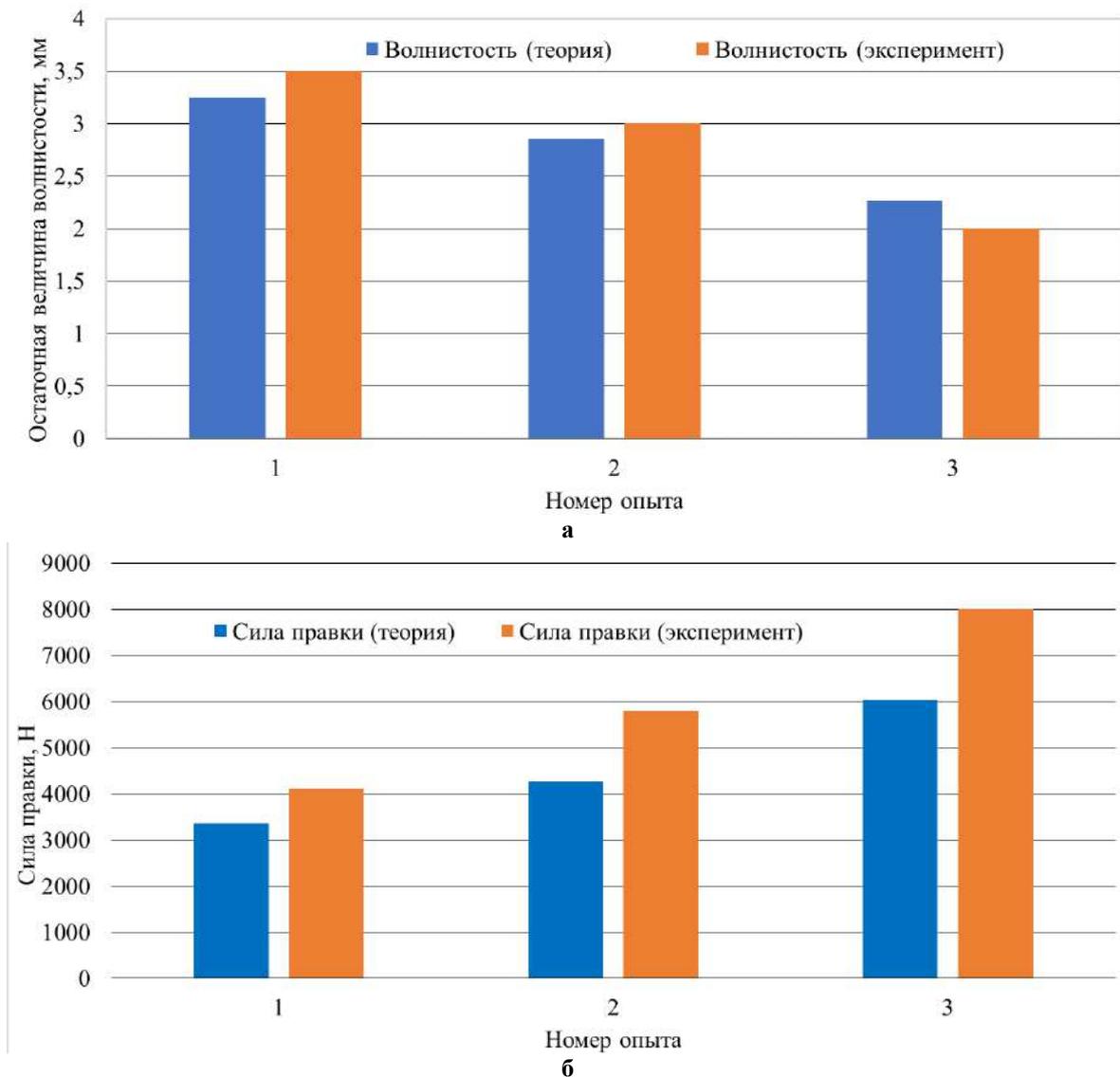


Рис. 14. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований: а – по величине остаточной волнистости; б – по величине силы правки

Обсуждение результатов исследования

Из анализа результатов реализации трехмерной конечно-элементной модели процесса правки на многороликовых правильных машинах с дифференциальным приложением силы правки по ширине листа видно, что с увеличением изгиба ролика краевая волнистость уменьшается. Без изгиба ролика за счет перераспределения деформаций высота волны уменьшилась на 9%, но при увеличении изгиба

ролика с 1,0 до 5 мм высота волны уменьшилась от 30 до 87%. Также на исправления волнистости листов влияет величина перекрытия роликов – при увеличении перекрытия с 3 до 10 мм максимальное значение эквивалентной деформации возросло в 2 раза – с 3% до 6%. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность модели по определению деформационных показателей процесса. Анализ полученных данных подтверждает эффективность применения изгиба рабочих роликов листопрямительной машины для исправления дефекта волнистости листов.

Выводы

Разработанная конечно-элементная модель процесса правки листов с изгибом рабочих роликов позволяет определить характер влияния величины перекрытия и прогиба рабочих роликов на волнистость готового проката. Представлены результаты расчета для листов толщиной 10 мм из стали 08кп с краевой волнистостью 4 мм. Показано, что при изгибе рабочих роликов на 1 мм краевая волнистость уменьшается на 30%, при изгибе на 2 мм – на 75%, при изгибе на 5 мм – на 87%. Данные результаты подтверждают эффективность технологии правки волнистости на ЛПМ, а предложенная модель позволяет рассчитывать рациональные настройки рабочих роликов.

Список использованной литературы

1. Шинкин В. Н. Расчет технологических параметров правки стального листа на одиннадцатирольковой листопрямительной машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate / В. Н. Шинкин // Производство проката. – 2014. – № 8. – С. 26–34.
2. Liu Zhifang. A new model for the plate leveling process based on curvature integration method / Zhifang Liu, Yongqin Wang, Xingchun Yan // International Journal of Mechanical Sciences. – 2012. – Vol. 54, Issue 1. – pp. 213-224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.10.011>.
3. Сатонин А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла и основных показателей качества при реализации процесса правки на многороликовых правильных машинах / А. В. Сатонин, Э. П. Грибков, О. А. Гаврильченко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 1 (18). – С. 268–273.
4. Уточненный метод расчета параметров процесса правки на многороликовых машинах / В. В. Тимченко, А. Б. Егоров, С. Ю. Саплин, О. А. Титаренко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 495–499.
5. Математическая модель технологических настроек ЛПМ ТЛС 2850 Ашинского металлургического завода для горячей и холодной правки листов / В. А. Федоринов, А. В. Барабаш, Е. Ю. Гаврильченко, Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 48–53.
6. Silvestre E. Testing and Modeling of Roll Levelling Process / E. Silvestre, E. S. de Argandoña, L. Galdos, J. Mendiguren // Key Engineering Materials. 2014 – Vols. 611-612. – pp. 1753-1762. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1753>.
7. Mathieu N. Flatness defects after bridle rolls: a numerical analysis of leveling / N. Mathieu, R. Dimitriou, A. Parrico, M. Potier-Ferry, H. Zahrouni // International Journal of Material Forming. – 2013. – Vol. 6. – Issue 2. – pp. 255-266. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-011-1083-2>.
8. Petruška J. A New Model for Fast Analysis of Leveling Process / J. Petruška, T. Návrát, F. Šebek // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 586, pp. 389-393. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.586.389>.
9. Lemoine X. Bauschinger effect correspondence of experimental tests / X. Lemoine, A. Aouafi // International Journal of Material Forming. – 2008. – Vol. 1. – Supplement 1. – pp. 241-244. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-008-0357-9>.
10. Dratz B. Testing and modelling the behaviour of steel sheets for roll levelling applications / B. Dratz, V. Nalewajk, J. Bikard, Y. Chastel // International Journal of Material Forming. – 2009. – Vol. 2. – Supplement 1. – pp.519–522. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-009-0560-3>.
11. Barabash A. V. Straightening of Sheet with Correction of Waviness / A. V. Barabash, E. Yu. Gavril'chenko, E. P. Gribkov, O. E. Markov // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44. – No. 12. – pp. 916–920. <http://dx.doi.org/10.3103/S096709121412002X>.