

УДК 621.771.01

Федоринов В. А.
Гаврильченко Е. Ю.
Завгородний А. В.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ ВОЛНИСТОСТИ НА ЛИСТОПРАВИЛЬНЫХ МАШИНАХ

Листовой металлопрокат является одним из основных видов готовой металлопродукции черной и цветной металлургии, достаточно широко используемым в машиностроении, приборостроении, в легкой промышленности, в строительной индустрии, а также в целом ряде других отраслей. Одним из основных требований, предъявляемым к листовому прокату является плоскостность. Исправление продольной кривизны листов полученной во время прокатки осуществляется методами правки на листопрямильных машинах [1–4]. Одним из путей совершенствования данного оборудования является создание изгиба оси рабочих роликов, что делает возможным дополнительное исправление поперечной кривизны листов [5]. При использовании данного типа машин актуальной является проблема определения оптимальной настройки рабочих роликов не только в продольном направлении движения листа, но и в поперечном, то есть определение помимо величины перекрытия роликов величины их изгиба. Указанное возможно при использовании трёхмерных математических моделей процесса правки листов [5–9].

Целью данной работы является создание трёхмерной конечно-элементной модели процесса правки волнистости листов.

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 [10].

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.

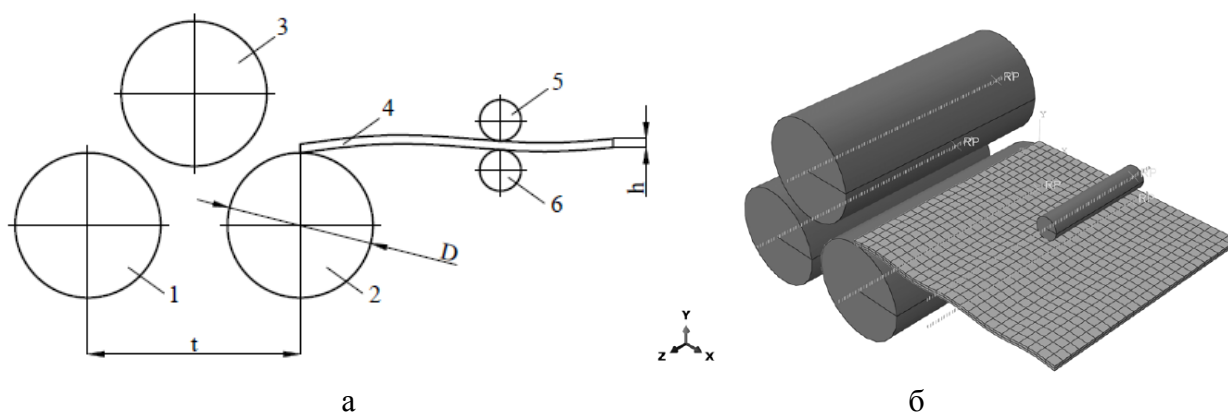


Рис. 1. Расчётная (а) и конечно-элементная в глобальной системе координат (б) модель процесса правки листов на листопрямильных машинах (1–3 – рабочие ролики; 4 – лист; 5, 6 – направляющие ролики)

При исследовании использовалась плоскость симметрии, что позволило сократить время расчёта.

С учетом изложенного выше производили дискретизацию объема (построение конечно-элементной сетки), занимаемого моделью, на элементарные области (конечные элементы) (см. рис 1, б). Для моделирования роликов были использованы трехмерные недеформируемые

элементы. Для моделирования листа были использованы элементы типа C3D8R – восьмиузловые линейные, твердотельные редуцированные элементы с контролем разрушения [11].

В соответствии с расчетной схемой (см. рис. 1, а) шаг машины t был принят 250 мм, диаметр рабочих роликов 1, 2, 3 $D = 220$ мм. Непосредственно моделирование процесса правки было выполнено для листа толщиной $h = 10$ 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).

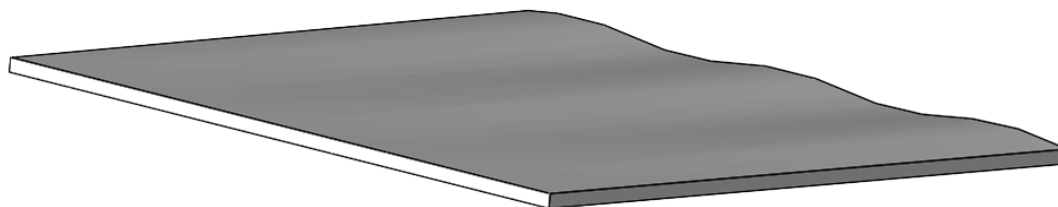


Рис. 2. Модель листа с краевой волнистостью

Исходная конечно-элементная модель имеет следующие граничные условия: нижние ролики машины 1 и 2, а также направляющие ролики 5 и 6 (см. 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.

В расчете использовалась модель классической пластичности металла, в качестве материала листа была принята сталь 08кп (кривую упрочнения см. рис. 3) [12].

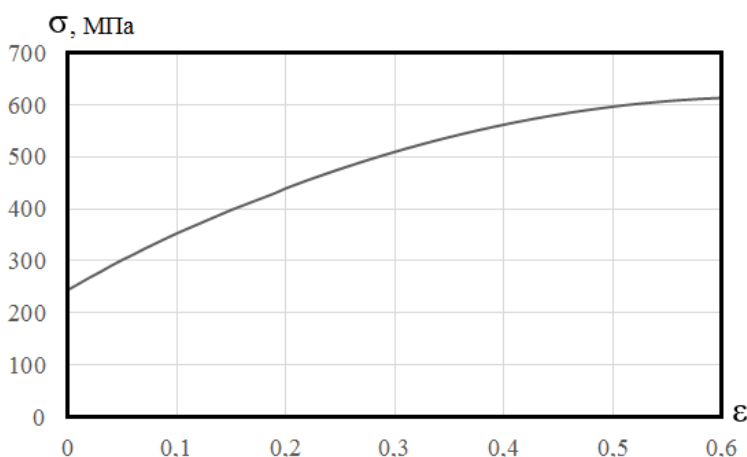


Рис. 3. Кривая упрочнения материала листа, используемая при расчете процесса правки [12]

Контакт между листом и роликами задавался при помощи модели контакта «Поверхность к поверхности» путем задания коэффициента трения $\mu = 0,2$.

После этого, 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 0,1 м/с. Время шага было принято 6 сек.

Для оценки полученных результатов выходными в данном случае параметрами были выбраны проекции реакций в контрольных точках роликов в глобальной системе координат $RF1, RF2, RF3$, а также перемещения, деформации и напряжения в узлах конечных элементов листа.

Расчеты были произведены для различных перекрытий и различного изгиба бочки роликов. На рис. 4 представлены поля распределения эквивалентных деформаций по поверхности листа при различных перекрытиях (а-е) и изгибах рабочих роликов (е-з).

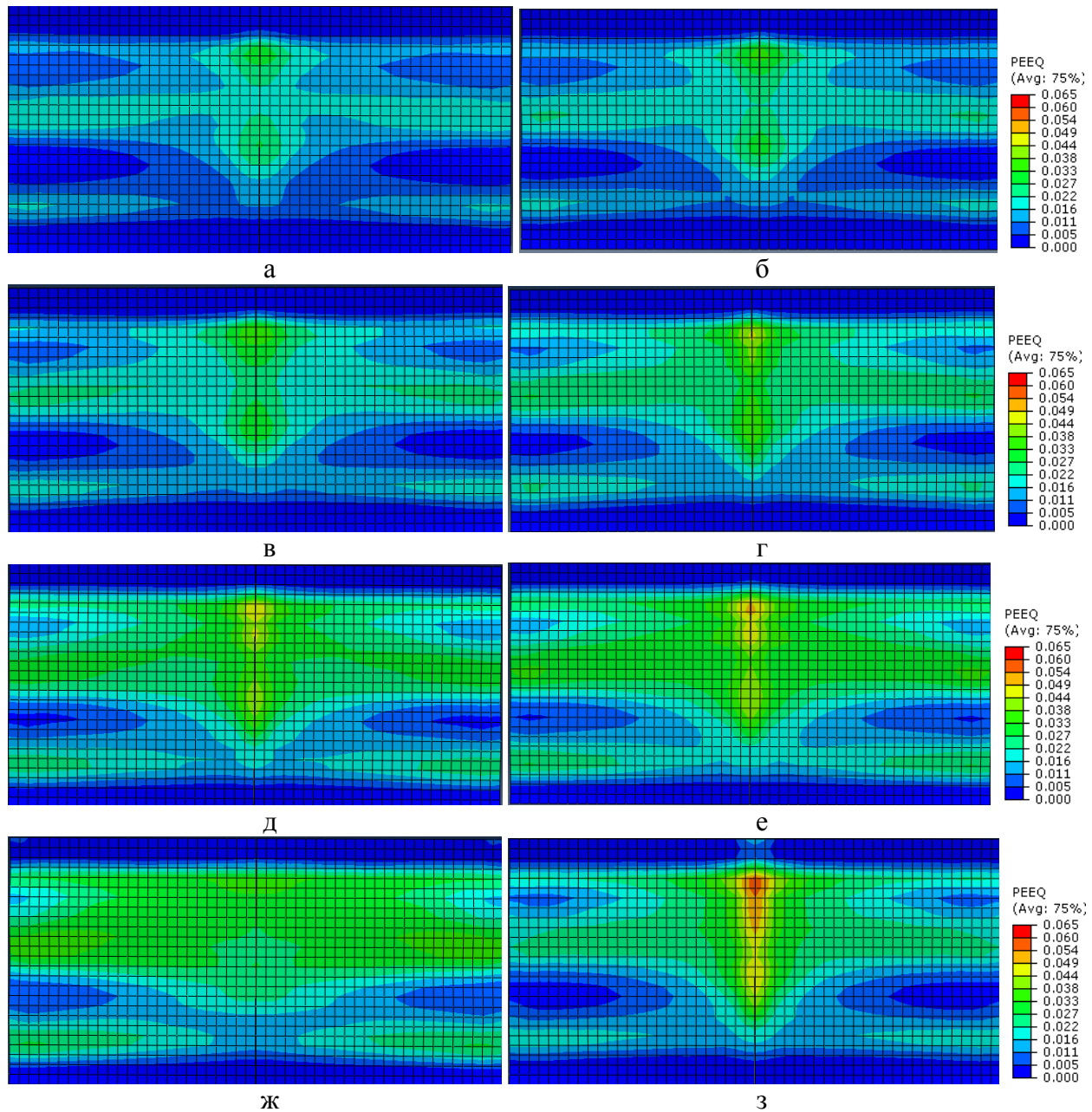


Рис. 4. Поля распределения эквивалентных деформаций по поверхности листов при различных перекрытиях (а-е) и изгибах (ж, з) рабочих роликов:

а – $W = 3$ мм, $dW = 2$ мм; б – $W = 4$ мм, $dW = 2$ мм; в – $W = 5$ мм, $dW = 2$ мм; г – $W = 7$ мм, $dW = 2$ мм; д – $W = 9$ мм, $dW = 2$ мм; е – $W = 10$ мм, $dW = 2$ мм; ж – $W = 10$ мм, $dW = 0$ мм; з – $W = 10$ мм, $dW = 5$ мм

Из анализа представленных распределений видно, что с увеличением величины перекрытия роликов W (рис. 4, а-е) 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. 4, ж) наблюдается относительно равномерное распределение деформации по поверхности листа на уровне 3,5%. При возрастании изгиба ролика деформация средних участков листа увеличивается (рис. 4, е, з) 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.

На рис. 5 представлены 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.

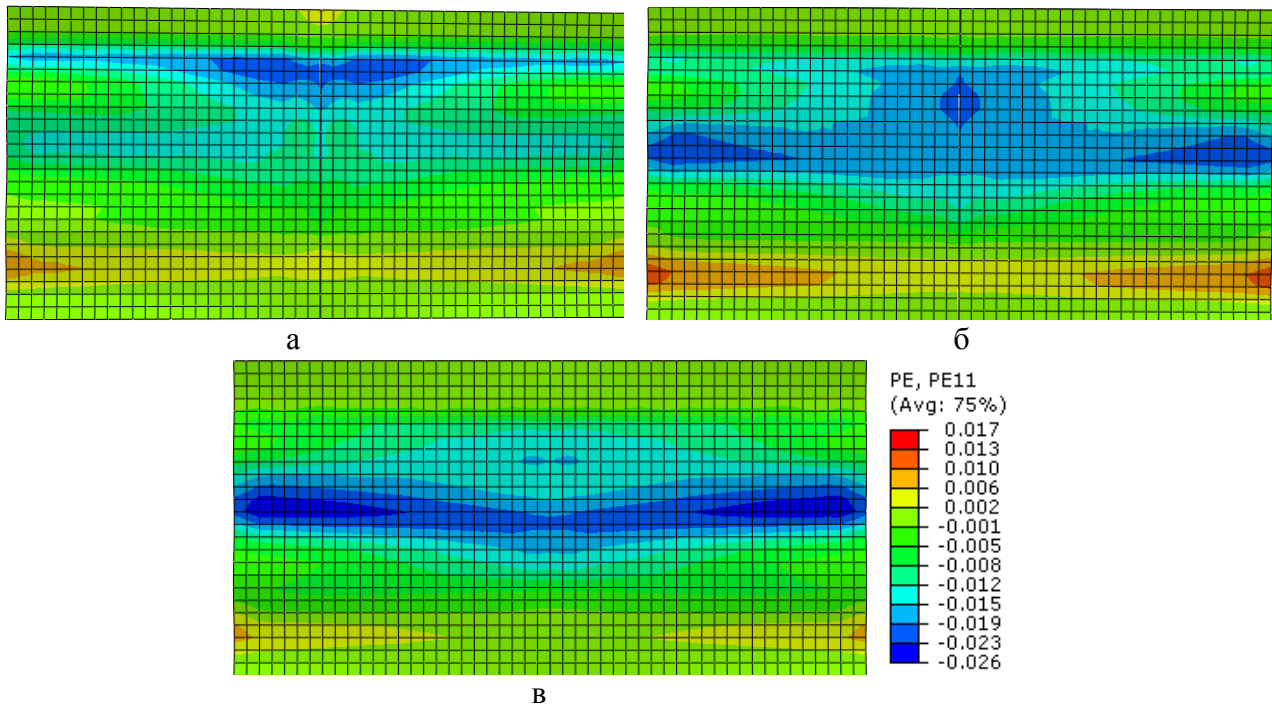


Рис. 5. Распределения продольной деформации на контактной поверхности листов в зависимости от величины изгиба рабочих роликов:

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

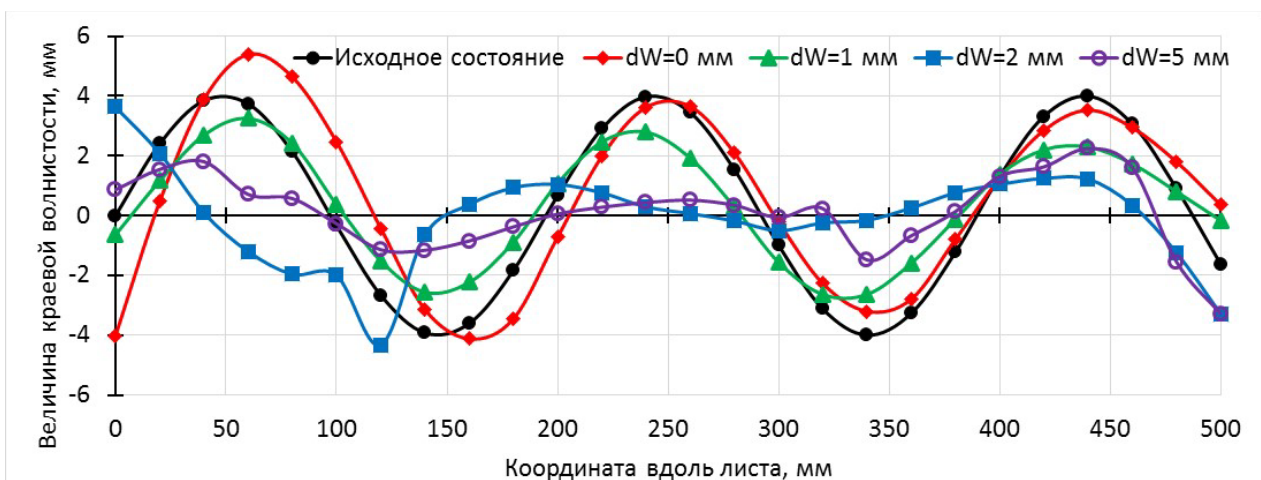


Рис. 6. Распределение краевой волнистости листов до и после правки при различных изгибах рабочих роликов

Из анализа, представленного на рис. 6, 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. 6). Данный факт подтверждает влияние величины изгиба ролика на исправление волнистости листов и возможность использования данного подхода для повышения качества правки 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 оптимальные настройки рабочих роликов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слоним А. З. *Правка листового и сортового проката* / А. З. Слоним, А. Л. Сонин. – М. : *Металлургия*, 1981. – 232 с.
2. Недорезов И. В. *Роликовые правильные машины АО «Уралмаш» и пути их совершенствования* / И. В. Недорезов, Б. Я. Орлов, А. Х. Винокурский // *Труды первого Конгресса прокатчиков*. – Магнитогорск, 23-27 октября, 1995. – М., 1996. – С. 38–42.
3. Королев А. А. *Механическое оборудование прокатных и трубных цехов* / А. А. Королев. – М. : *Металлургия*, 1987. – 480 с.
4. Луговской В. М. *Теория расчета листопрямильных машин и автоматизация их проектирования* / В. М. Луговской. – Труды ВНИИМЕТМАШ. – М. : *Металлургия*, 1970. – № 26 – С. 8–30.
5. Шинкин В. Н. *Расчет технологических параметров правки стального листа на одиннадцатироликовой листопрямильной машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate* / В. Н. Шинкин // *Производство проката*. – 2014. – № 8. – С. 26–34.
6. Park K. *Development of a Finite Element Analysis Program for Roller Leveling and Application for Removing Blanking Bow Defects of Thin Steel Sheet* / K. Park, S. Hwang // *ISIJ International*. – Vol. 42 (2002). – № 9. – P. 990–999. – <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.42.990>.
7. Cui L. *Analysis of Leveling Strategy for a plate Mill* / L. Cui, X. Hu, X. Liu // *Advanced Materials Research*. – Vol. 145 (2011). – P. 424–428. – <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>.
8. Cui L. *Research on Mathematical Model of Leveling Process for Plate Mill* / L. Cui, X. Hu, X. Liu // *Advanced Materials Research*. – Vol. 148–149 (2011). – P. 368–371. – <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.368>.
9. Doegea E. *Analysis of the levelling process based upon an analytic forming model* / E. Doegea, R. Menza, S. Huininka // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2002. – Vol. 51. – Issue 1. – P. 191–194. – [doi:10.1016/S0007-8506\(07\)61497-8](http://doi:10.1016/S0007-8506(07)61497-8).
10. Боровік П. В. *Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: навч. посіб.* / П. В. Боровік. – Алчевськ : ДонДТУ, 2012. – 170 с.
11. Манильк Т. *Практическое применение программного комплекса АВАQUS в инженерных задачах. Версия 6.5* / Т. Манильк, К. Ильин. — М. : МФТИ, ТЕСИС, 2006. – 99 с.
12. Кроха В. А. *Кривые упрочнения металлов при холодной деформации* / В. А. Кроха. – М. : *Машиностроение*, 1968. – 131 с.

REFERENCES

1. Slonim A. Z. *Pravka listovogo i sortovogo prokata* / A. Z. Slonim, A. L. Sonin. – M. : *Metallurgija*, 1981. – 232 s.
2. Nedorezov I. V. *Rolikovye pravil'nye mashiny AO «Uralmash» i puti ih sovershenstvovanija* / I. V. Nedorezov, B. Ja. Orlov, A. H. Vinokurskij // *Trudy pervogo Kongressa prokatchikov*. – Magnitogorsk, 23-27 oktjabrja, 1995. – M., 1996. – S. 38–42.

3. Korolev A. A. *Mehanicheskoe oborudovanie prokatnyh i trubnyh cehov* / A. A. Korolev. – M. : Me-tallurgija, 1987. – 480 s.
4. Lugovskoj V. M. *Teorija rascheta listopravil'nyh mashin i avtomatizacija ih proektirovanija* / V. M. Lugovskoj. – Trudy VNIIMETMASH. – M. : Metallurgija, 1970. – № 26 – S. 8–30.
5. Shinkin V. N. *Raschet tehnologicheskikh parametrov pravki stal'nogo lista na odinnadcatirolikovoj listopravil'noj mashine linii poperechnoj rezki firmy Fagor Arrasate* / V. N. Shinkin // *Proizvodstvo prokata*. – 2014. – № 8. – S. 26–34.
6. Park K. *Development of a Finite Element Analysis Program for Roller Leveling and Application for Removing Blanking Bow Defects of Thin Steel Sheet* / K. Park, S. Hwang // *ISIJ International*. – Vol. 42 (2002). – № 9. – P. 990–999. – <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.42.990>.
7. Cui L. *Analysis of Leveling Strategy for a plate Mill* / L. Cui, X. Hu, X. Liu // *Advanced Materials Research*. – Vol. 145 (2011). – P. 424–428. – <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>.
8. Cui L. *Research on Mathematical Model of Leveling Process for Plate Mill* / L. Cui, X. Hu, X. Liu // *Advanced Materials Research*. – Vol. 148–149 (2011). – P. 368–371. – <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.368>.
9. Doegea E. *Analysis of the levelling process based upon an analytic forming model* / E. Doegea, R. Menza, S. Huininka // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2002. – Vol. 51. – Issue 1. – P. 191–194. – [doi:10.1016/S0007-8506\(07\)61497-8](http://doi:10.1016/S0007-8506(07)61497-8).
10. Borovik P. V. *Teoretichni doslidzhennja procesiv obrobki metaliv tiskom na osnovi metodu skinchenih elementiv: navch. posib.* / P. V. Borovik. – Alchevs'k : DonDTU, 2012. – 170 s.
11. Manilyk T. *Prakticheskoe primenenie programmnoho kompleksa ABAQUS v inzhenernyh zadachah. Versija 6.5* / T. Manilyk, K. Il'in. – M. : MFTI, TESIS, 2006. – 99 s.
12. Kroha V. A. *Krivye uprochnenija metallov pri holodnoj deformacii* / V. A. Kroha. – M. : Mashinostroenie, 1968. – 131 s.

Федоринов В. А. – канд. техн. наук, проф., зав. каф. АММ ДГМА;

Гаврильченко Е. Ю. – начальник бюро агрегатных линий ПАО НКМЗ, аспирант ДГМА;

Завгородний А. В. – канд. техн. наук, ст. преп. ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;

НКМЗ – Новокраматорский машиностроительный завод, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 25.09.2015 г.