

УДК 621.771.01

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

При проектировании нового оборудования и совершенствовании технологии правки листового металлопроката наиболее рациональным является использование инженерных методик расчета напряженно-деформированного состояния, которые позволяют решать задачи оптимизационного плана [1–5]. Наиболее строгими по постановке и в то же время наиболее информативными среди численных решений являются двух- и трехмерные математические модели, основанные на использовании вариационных методов, метода конечных или метода граничных элементов. Но их использование в АСУ ЛПМ затруднено из-за низкого быстродействия.

В соответствии с этим в данной работе основное внимание уделено инженерной модели 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 учёт напряжения металла при правке [6–8].

Целью работы является совершенствование математической модели процесса правки листового металлопроката с целью определения оптимальных технологических настроек листопрямительной машины в условиях горячей и холодной правки в широком диапазоне толщин проката.

Для упрощения модели и снижения трудоемкости вычислений был принят ряд допущений:

- геометрическая линейность задачи, что позволяет вследствие малости углов наклона листа описывать кривизну по упрощенной формуле $\chi = d^2y/dx^2$;
- в модели рассматривается два случая: материал листа либо не упрочняется, либо его пластическое состояние определяется принципом Мазинга и эффект Баушингера учитывается как идеальный;
- кусочно-линейная аппроксимация эпюры изгибающих моментов при вертикальном направлении реакций роликов из-за малости углов наклона листа.

Следует отметить, что разработанный алгоритм математической модели позволяет определять требуемую для исправления продольной кривизны технологическую настройку правильной машины, что сводится к определению настроечных координат каждого из подвижных роликов в зависимости от известных параметров выправляемого металла, геометрических параметров листопрямительной машины, а также допускаемого значения остаточной кривизны металла после правки.

Изучая опыт эксплуатации оборудования, для облегчения задачи металла в правильную машину первый по ходу металла ролик – верхний целесообразно устанавливать на толщину металла, а значение прогиба металла первыми роликами на входе в машину соответствует:

$$f_3 = \frac{\sigma_s t^3}{KEh}, \quad (1)$$

где σ_s – напряжение текучести материала полосы, подвергаемой правке, МПа;

t – шаг роликов правильной машины, мм;

E – модуль упругости, МПа;

h – толщина полосы, подвергаемой правке на листопрямительной машине, мм;

K – коэффициент проникновения пластической деформации.

При этом особенностью данной модели является поиск оптимального значения коэффициента проникновения пластической деформации. При этом наблюдается тенденция его снижения с увеличением толщины, а также температуры проката.

В качестве исходных данных были использованы следующие:

- диаметр роликов d листопрямительной машины;
- шаг роликов t листопрямительной машины;
- количество n роликов, а также их особенность расположения;
- толщина листа h , напряжение текучести материала листа;
- исходная кривизна листа;
- максимально допустимая кривизна листа после правки.

Основываясь на указанных предпосылках, полученных из опыта эксплуатации и, используя вышеприведенные исходные данные, был разработан следующий алгоритм автоматизированного проектирования технологической настройки многороликовой листопрямительной машины, приведенный для конструкции с возможностью индивидуальной настройки роликов.

На первом этапе для всего цикла проектирования все нижние ролики лежат в одной плоскости на уровне правки, а верхние ролики устанавливаются на расстоянии от нижних, равном толщине выправляемого металла.

На втором этапе первый ролик остается без изменений, а последующие верхние ролики, начиная со 2-го, опускаются на величину, равную расчетному прогибу f_3 .

Третий этап заключается в моделировании процесса правки для полученных координат правильных роликов. Происходит проверка, которая заключается в следующем: когда кривизна металла на выходе из машины меньше или равна допускаемой, проектирование завершается, настройка считается приемлемой. Если же кривизна полосы на выходе из листопрямительной машины превышает допустимое значение, то ролики № 1 и 3 остаются на месте, а верхние ролики, начиная с № 5, начинают приподнимать на величину, равную точности позиционирования осей роликов имеющимся нажимным механизмом.

Для полученных координат снова производится повтор третьего этапа.

После того, как остаточная продольная кривизна листа войдет в допустимый интервал кривизны, проверяется показатель формы листа и в случае необходимости проводят корректировку коэффициента проникновения пластической деформации.

Применение программной реализации описанной математической модели с точки зрения многокритериального поиска экстремумов для нахождения наиболее адекватных параметров технологических процессов для заданных исходных характеристик механического оборудования и сортамента выправляемого металлопроката позволяет выбрать такой набор технологических настроек, при котором, с одной стороны, достигается минимальный прогиб листа и, соответственно, минимальная величина силы и момента правки, что является актуальным для решения задач расширения сортамента обрабатываемого металлопроката на существующих листопрямительных машинах с ограниченными технологическими возможностями, а с другой стороны, нахождения настроек, обеспечивающих наилучшее качество готовой продукции на современных листопрямительных машинах, способных реализовать индивидуальную настройку правильных роликов, включая учет показателей плоскостности листа.

Имеющие своей целью оценку степени достоверности полученных математических моделей, а также уточнение исходных предпосылок для их численной реализации, экспериментальные исследования процесса правки на листопрямительных машинах в лабораторных условиях кафедры АММ ДГМА были проведены с использованием специально спроектированной экспериментальной установки для правки с 9-ю правильными роликами диаметром 100 мм, размещенными в рабочей клетке правильной машины с шагом 105 мм. Данная установка представляет собой 9-ти роликовую листопрямительную машину классического исполнения, рабочая клетка которой, включает в себя девять рабочих роликов, из которых первых пять роликов по ходу движения листа выполнены приводными, а остальные – не приводными.

Анализ результатов экспериментальных исследований в лабораторных условиях на специально созданной установке девятироликовой листопрямляющей машины подтвердил качественное и количественное соответствие результатов расчетных исследований и лабораторных экспериментов.

С целью промышленной адаптации разработанных математических моделей и программных средств были проведены экспериментальные исследования в условиях действующего цеха на листопрямляющей машине толстолистового стана 2850 Ашинского металлургического завода. Данная листопрямляющая машина конструкции ПАО «НКМЗ» введена в эксплуатацию в декабре 2013 года и обладает следующими преимуществами

- листопрямляющая машина ТЛС 2850 АМЗ является одной из наиболее современных и позволяет реализовать индивидуальную настройку рабочих роликов;
- система автоматического управления листопрямляющей машиной оснащена диагностическим комплексом ИВА, позволяющим вести мониторинг большого числа параметров работы оборудования, таких как задание и фактическое положение траверсы листопрямляющей машины и каждого из правильных роликов, давления в нажимных гидравлических цилиндрах, заданной и фактической скорости, тока и момента на каждом из двигателей привода правильных роликов и т. п.

Пример осциллографического представления протокола записи технологических параметров в автоматической системе диагностики ИВА показан на рис. 1. После расшифровки и сопоставления данных с информацией рапортов прокатки по рабочей клетки (данных о геометрическом и марочном сортаменте прокатанного металла) анализировалось соответствие результатов расчета энергосиловых параметров и их фактических значений.

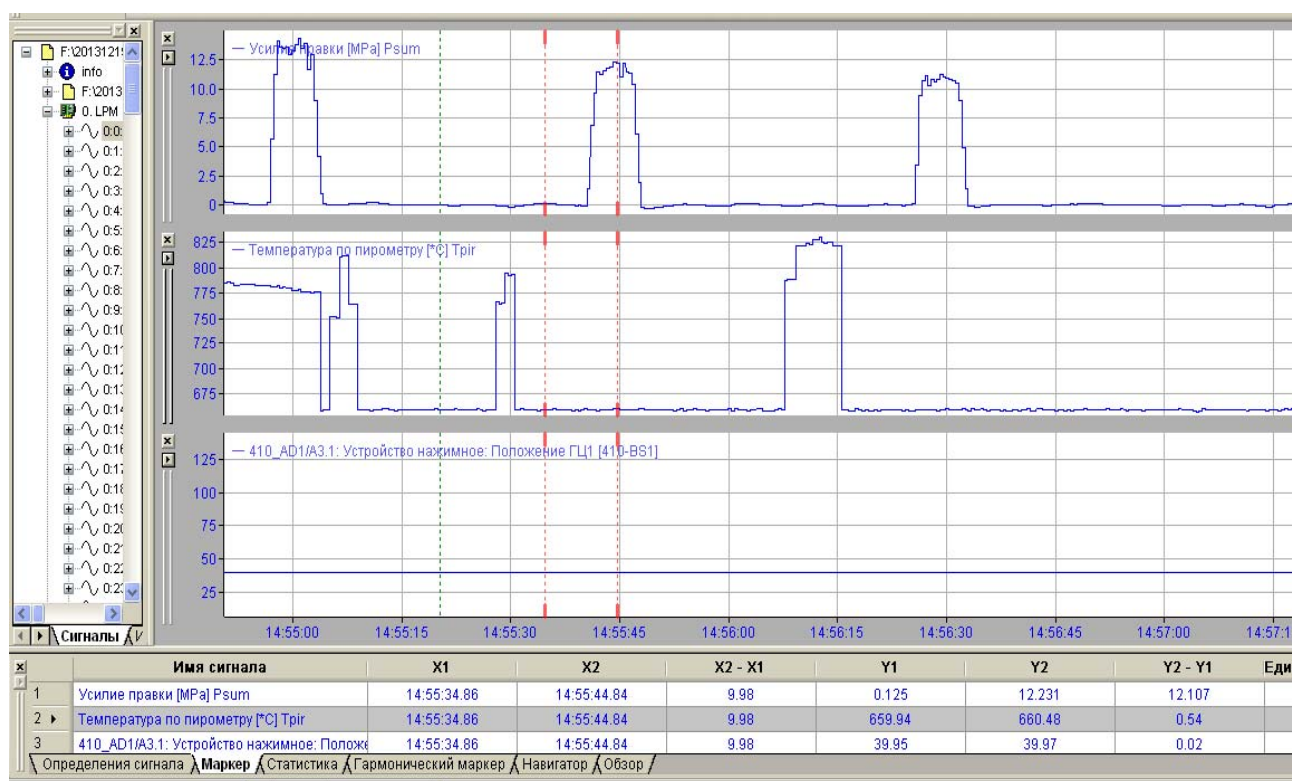


Рис. 1. Распределения параметров процесса правки на ЛПМ ТЛС 2850 АМЗ, отображенные в системе ИВА

В ходе промышленной адаптации разработанной математической модели был выправлены горячекатаные толстые листы из различных марок сталей (стали 03сп, 20, 30, 45, 09Г2Ф, 13ХГСА) толщиной от 8 до 100 мм и шириной в диапазоне 1500–2000 мм при температурах от 650 до 850°C (рис. 2).



Рис. 2. Горячая правка листа из стали 3сп толщиной 100 мм при температуре 850 °С

Суммарную силу правки определяли по разнице между давлением в основных и уравновешивающих гидроцилиндрах. В процессе как горячей, так и холодной правки листов нагрузки на станину машины не превышали допустимых значений. В результате правки получали планшетность на указанных листах соответствующую требованиям ГОСТ.

Холодной правке подвергали листы толщиной 8–25 мм, имеющих ярко выраженные дефекты плоскостности такие как: коробоватость и продольная волнистость, превышающая 30 мм/м, при температуре до 50 °С (рис. 3).

Листы укладывали цеховым краном на рольганг перед листопрямительной машиной, очищали поверхность от загрязнений и замеряли толщину в трех-четырех точках по длине листа, а также геометрические параметры исходных дефектов плоскостности. Для замеров использовали поверочные линейки длиной 1 м и 2 м, штангенциркуль, линейку и набор щупов. На рис. 4 показан принцип замеров дефектов плоскостности на примере листа толщиной 16 мм из стали 3сп. Поверхность листа имела продольную волну величиной до 32 мм/м, а также коробоватость в хвостовой части листа порядка 12 мм на ширине 2 м. Зафиксированные дефекты на поверхности листов отмечались мелом с указанием вида дефекта и его величины.

В результате правки планшетность обработанных листов была доведена показателей, удовлетворяющих требования ГОСТа и даже превышающих их (рис. 5). В основном правка выполнялась за один проход.



а



б

Рис. 3. Холодная правка листов из стали 09Г2С:
а – толщина 16 мм; б – толщина 8 мм



Рис. 4. Замеры толщины выправляемого металла и исходных дефектов плоскостности: а – волнистости; б – коробоватости



Рис. 5. Замеры дефектов плоскостности листа после правки: а – волнистости; б – коробоватости

Результаты экспериментальных исследований на промышленном оборудовании в условиях листопрокатного цеха ТЛС 2850 Ашинского металлургического завода подтвердили адекватность результатов расчета параметров качества выправляемого металла с помощью разработанной математической модели. Проведенная правка партии горячекатаных толстых листов из различных марок сталей толщиной от 8 до 100 мм без замечаний со стороны ОТК цеха подтвердили возможность применения разработанной одномерной математической модели в системах автоматизированного управления оборудованием для горячей и холодной правки листов.

ВЫВОДЫ

В процессе экспериментальных правок было определено фактическое влияние коэффициента проникновения пластической деформации на результирующую плоскостность листов. Установлено, что для горячей правки наиболее приемлемо значение 2,5–4, в то время как для холодной правки составляет 4–6 в зависимости от исходной кривизны листов (чем больше кривизна, тем выше значение). Также было установлено, что для холодной правки листов с высоким уровнем коробоватости требуется два прохода (для получения плоскостности сверх требований ГОСТов). В целом математическая модель обеспечивает настройку ЛППМ, позволяющую в результате как горячей, так и холодной правки получать качественный металлопрокат с показателями плоскостности согласно требованиям современных отечественных и зарубежных стандартов.

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 Остринский А. С. *Определение расчетных параметров листовых роликовых правильных машин* / А. С. Остринский. – *Труды ВНИИМЕТМАШ : сб. науч. пр.* – № 18. – С. 7–32.
- 5 Луговой В. М. *Теория расчета листопрямильных машин и автоматизация их проектирования* / В. М. Луговой. – *Труды ВНИИМЕТМАШ*. – М. : *Металлургия*, 1970. – № 26 – С. 8–30.
- 6 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 : зб. наук. праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 1 (18). – С. 268–273.
- 7 Тимченко В. В. *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.
- 8 Сатонин А. В. *Анализ влияния температуры и геометрических характеристик на энергосиловые параметры при реализации процесса горячей правки относительно толстых листов* / А. В. Сатонин, О. А. Гаврильченко, А. И. Титаренко, А. В. Шестопалов // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 115–119.

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. : – *Metallurgija*, 1987. – 480 s.
- 4 Ostrinskij A. S. *Opredelenie raschetnyh parametrov listovyh rolikovyh pravil'nyh mashin* / A. S. Ostrinskij. – *Trudy VNIIMETMASH : sb. nauk. pr.* – № 18. – S. 7–32.
- 5 Lugovskoj V. M. *Teorija rascheta listopravil'nyh mashin i avtomatizacija ih proektirovanija* / V. M. Lugovskoj. – *Trudy VNIIMETMASH*. – M. : *Metallurgija*, 1970. – № 26 – S. 8–30.
- 6 Satonin A. V. *Matematicheskoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla i osnovnyh pokazatelej kachestva pri realizacii processa pravki na mnogorolikovyh pravil'nyh mashinah* / A. V. Satonin, Je. P. Gribkov, O. A. Gavril'chenko // *Visnik Donbas'koï derzhavnoï mashinobudivnoï akademii : zb. nauk. prac'*. – Kramators'k : DDMA, 2010. – № 1 (18). – S. 268–273.
- 7 Timchenko V. V. *Utochnennyj metod rascheta parametrov processa pravki na mnogorolikovyh mashinah* / V. V. Timchenko, A. B. Egorov, S. Ju. Saplin, O. A. Titarenko // *Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduванні*. – Kramators'k : DDMA, 2005. – S. 495–499.
- 8 Satonin A. V. *Analiz vlijanija temperatury i geometricheskikh harakteristik na jenergosilovye parametry pri realizacii processa gorjachej pravki odnositel'no tolstyh listov* / A. V. Satonin, O. A. Gavril'chenko, A. I. Titarenko, A. V. Shestopalov // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2008. – № 1 (19). – S. 115–119.

- Федоринов В. А. – канд. техн. наук, проф., зав. каф. АММ ДГМА
 Барабаш А. В. – гл. конструктор отдела производства прокатного оборудования ПАО «НКМЗ»
 Гаврильченко Е. Ю. – аспирант каф. АММ ДГМА; вед. конструктор ПАО «НКМЗ»
 Грибков Э. П. – канд. техн. наук, доц., докторант каф. АММ ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

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

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 15.01.2014 г.