

УДК 621.982

*Доктор техн. наук, профессор Сатонин А.В.  
ведущий инженер Шестопалов А.В.  
канд. техн. наук, старший преподаватель Сатонин А.А.  
аспирант Титаренко О.А.  
студент Кучерук Н.В.  
(ДГМА, г. Краматорск, Украина)*

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ НА МНОГОРОЛИКОВЫХ ПРАВИЛЬНЫХ МАШИНАХ**

*Приведені результати математичного моделювання та створення програмних засобів з автоматизованого проектування технологічних налаштувань та керування режимами роботи багатороликкових листопрямильних машин.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Операции по отделке готового металлопроката во многом определяют качество, а, следовательно, и себестоимость, а также конкурентоспособность выпускаемой продукции. Отмеченное, в полной мере касается процессов горячей правки относительно толстых листов.

В настоящее время происходит реконструкции оборудования толстолистового стана 2800 Алчевского металлургического комбината, в рамках которой устанавливаются новые черновая и чистовая прокатные клетки, а также установка контролируемого охлаждения и многороликовая листопрямильная машина. Особенность данной компоновки состоит в том, что листопрямильная машина находится в линии стана, что исключает возможность ее реверсирования и правки за несколько проходов и накладывает дополнительную ответственность при выборе технологических настроек работы листопрямильной машины. Проектная производительность стана 1 млн. тонн в год, что потребовало организации автоматизированной работы оборудования на всех этапах, включая горячую правку готового листа.

**Анализ исследований и публикаций.** Анализ отечественных и зарубежных исследований и разработок показывает, что большое внимание уделяется вопросам автоматизированного расчета энергосиловых параметров при реализации процессов правки [1-3], в то время как вопросы прогнозирования основных показателей качества исследованы

далеко не полностью [1]. В качестве методик для определения силы, моментов и мощности правки можно рассматривать работы Целикова А.И. [2], Остринского [3], однако опыт эксплуатации листопрямильных машин свидетельствует о завышенных результатах, предоставляемых данными методиками, что приводит к значительному завышению металлоемкости оборудования с одной стороны, а также к сужению сортамента обрабатываемого металлопроката с другой. Невозможность достаточно достоверного прогнозирования результирующей кривизны листа приводит к невозможности создания программных средств по автоматизированному проектированию технологических режимов процесса правки. Следует отметить, что математические модели процесса правки, основанные на методе конечных элементов, позволяют решить задачу об определении результирующей формы листа, однако их применение невозможно вследствие высокой трудоемкости и времени численной реализации [4].

**Постановка задачи.** Разработать быстродействующую математическую модель процесса горячей правки изгибом относительно толстых листов, позволяющую прогнозирование основных показателей качества готовой металлопродукции, а также автоматизированное проектирование технологических режимов работы многороликовой листопрямильной машины.

**Изложение материала и его результаты.** При разработке соответствующей математической модели процесса правки в основу был положен минимум упрощений:

- гипотеза начальных размеров, или геометрическая линейность задачи, как в случае балки. Математически это означает, что вследствие малости углов наклона листа допустимо пренебречь квадратом производной в точной формуле кривизны:

$$\chi = \frac{d^2y/dx^2}{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}} \quad (1)$$

для изогнутой продольной оси, т.е. линии прогибов, если форма линии выражается зависимостью  $y(x)$ ;

- кусочно-линейный характер эпюры изгибающего момента и вертикальное направление реакций роликов, что следует из малости углов наклона листа и продольных сил по сравнению с поперечными;

- применимость принципа Мазинга к гистерезисной зависимости между кривизной и изгибающим моментом, что следует из малости деформации среднего слоя листа.

На рис. 1 приведена расчетная схема  $i$ -го межроликового участка листа толщиной  $h$ , полностью заданного в машину,  $i = 1 \dots n - 1$ , где  $n$  - количество роликов.

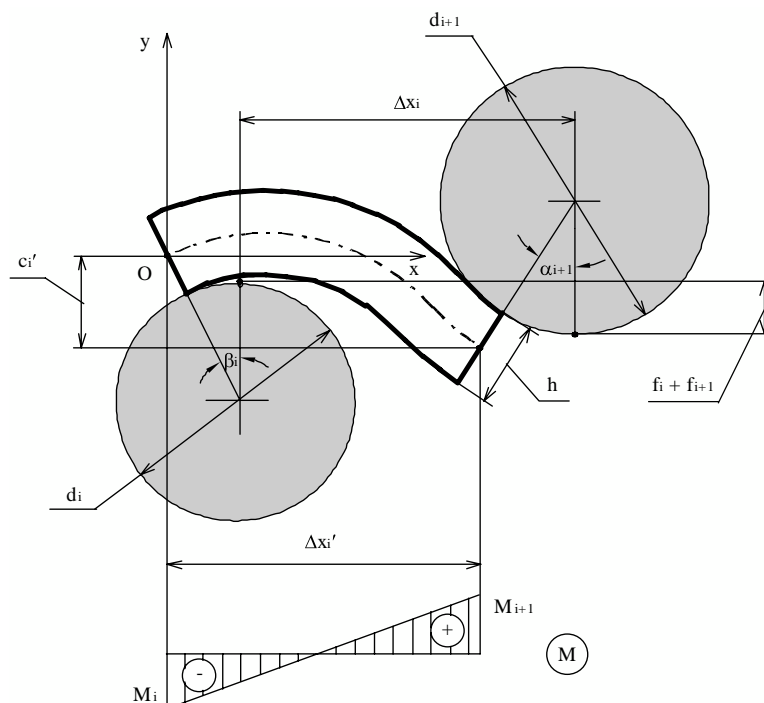


Рисунок 1 – Расчетная схема межроликового участка листа

Диаметры роликов  $d_i$  и горизонтальные расстояния между их осями  $\Delta x_i$  в общем случае предполагаются переменными, поэтому методика охватывает схемы правки с наличием направляющего и корректирующего роликов, которые используются в машинах с параллельной настройкой, а также может быть применена к правильному стану. Через  $f_i$ ,  $f_{i+1}$  обозначены перекрытия роликов относительно уровня правки (одно из них для данной пары роликов, как правило, равно нулю, а второе отсчитывается в сторону увеличения прогиба листа),  $\Delta x_i'$  и  $c_i'$  - соответственно горизонтальное и вертикальное расстояния между краями участка с учетом смещения,  $\beta_i$  и  $\alpha_{i+1}$  - углы поворота крайних сечений (на схеме приняты положительными). Для машины с постоянным шагом  $t$  и диаметром роликов  $d$ , очевидно,  $\Delta x_i = t/2$ ,  $d_i = d$ . Начало координат совмещено с началом участка, ось абсцисс направлена по горизонтали в сторону движения металла, ось ординат - в сторону той поверхности листа, которая не контактирует с  $i$ -м роликом.

В дальнейшем задача была сведена к решению упрощенного дифференциального уравнения:

$$d^2y/dx^2 = \chi, \quad (2)$$

дополненного граничными условиями:

$$x = 0 \Rightarrow y = 0; \quad dy/dx = \operatorname{tg}\beta_i; \quad x = \Delta x_i' \Rightarrow y = -c_i'; \quad dy/dx = -\operatorname{tg}\alpha_{i+1}$$

и была решена на основе организации итерационной процедуры по нахождению углов подхода  $\alpha_i$  и схода  $\beta_i$  листа на каждом из роликов.

Исходя из определенной геометрии нейтральной линии, производили расчет локальных и интегральных характеристик наряду деформированного состояния металла. Отличительной особенностью разработанной математической модели является возможность расчета не только энергосиловых параметров, а и основных показателей качества готового металлопроката, к которым следует отнести результирующую кривизну  $\chi_1$ . Следует отметить, что разработанная математическая модель была реализована на языке низкого уровня С, что обеспечило высокое быстроедействие и, как следствие, возможность ее использования в качестве целевой функции при постановке и решении задач многовариантного плана, к которым относятся задачи оптимизации и автоматизированного проектирования.

Задача же автоматизированного проектирования технологических режимов процесса правки в данном случае сводится к нахождению значений перегибов листа на каждом ролике, которым соответствует минимум результирующей кривизны. При этом, принимали перегиб листа на первом ролике равным нулю  $C_1 = 0$ , исходя из соображений надежного захвата листа роликами листопрямительной машины, а прогиб листа по третьим роликом  $C_3$  определяли исходя из регламентируемого соотношения радиуса предельно упругого радиуса изгиба листа и кривизны листа под роликом  $R_{\text{упр}}/R_3$ , а именно:

$$R_{\text{упр}} = (C_{\text{упр}}^2 + t^2/4)/(2 \cdot C_{\text{упр}}); \quad (3)$$

$$R_3 = (C_3^2 + t^2/4)/(2 \cdot C_3), \quad (4)$$

где  $C_{\text{упр}} = \sigma_T t^2 / (12 \cdot E_n \cdot h)$  - максимальный упругий прогиб листа при рассмотрении его как консольной балки;

$\sigma_T$ ,  $E_n$  - предел текучести и модуль упругости материала листа.

Таким образом, задача сводится к однопараметрической минимизационной по поиску угла наклона роликов верхней кассеты к роликам нижней кассеты, расположенным условно горизонтально и не имеющим механизмов индивидуальной настройки; которому соответствует минимум конечной кривизны листа. Схема расположения роликов после окончания расчета их положений представлена на рисунке 2. Здесь пунктирными линиями отмечены положения роликов при их установке на толщину листа, то есть  $C_i = 0$ . Для учета возможности нахождения исходной кривизны листа в определенном интервале производили расчет конечной кривизны листа при заданной настройке и значениях исходной кривизны, соответствующих границам возможного диапазона и для минимизации использовали большее из двух полученных значений.

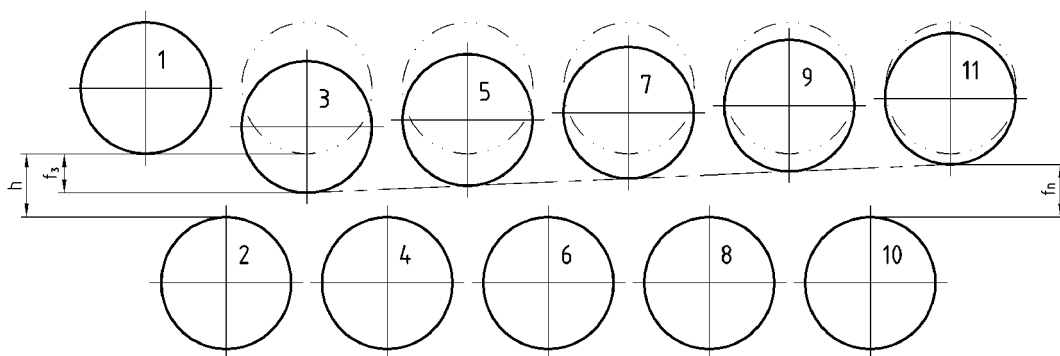


Рисунок 2 - Схема расположения роликов ЛПМ после завершения проектирования настройки.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В рамках исследований разработана математическая модель, позволяющая произвести автоматизированное проектирование технологических режимов процессов горячей правки относительно толстых листов на многороликовых правильных машинах, позволяющая определить настройки рабочих роликов, соответствующие минимальной результирующей кривизне листа. Данная математическая модель позволяет корректно учесть механические свойства материала листа, его исходные геометрические характеристики, а также особенности используемого механического оборудования.

*Приведены результаты математического моделирования и создания программных средств по автоматизированному проектированию технологических настроек и управления режимами работы многороликовых правильных машин.*

*The results of mathematical modeling and generation of software for automated designing of technological adjustment and controlling operating regimes of multiroll straightener is introduced.*

**Библиографический список.**

1. *Слоним А.З., Сонин А.Л. Машины для правки листового и сортового материала – М.:Машиностроение, 1975. – 208 с.*
2. *Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. М.: Металлургиздат, 1958. – 432 с.*
3. *Остринский А.С. Определение расчетных параметров листовых роликовых правильных машин. – Труды ВНИИМЕТМАШ, Сборник №18, С. 7-32.*
4. *Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко, В.А. Гриневич. - Днепропетровск.: Системные технологии, 2005. – 448 с.*