

УДК 658.52.011.56;621.771.06

**А. Н. Миронов, канд. техн. наук А. П. Егоров, канд. техн. наук О. Е. Потап,  
канд. техн. наук И. Г. Тригуб**

*Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ В ДВУХНИТОЧНОЙ ЧЕРНОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО МЕЛКОСОРТНОГО СТАНА**

*При производстве мелкосортных профилей потери металла в обрезь связаны с нестабильностью геометрических размеров сечения мелкосортного проката, что обусловлено нерациональной настройкой скоростного режима прокатки. Вместе с тем оценка величины натяжения проката позволит осуществить корректировку скоростного режима и таким образом минимизировать нестабильность площади поперечного сечения подката на входе в чистовую группу клетей. Сложность разработки такого способа оценки заключается в отсутствии соответствующих измерительных средств размеров проката и величины натяжения. В связи с этим актуальной задачей является разработка компьютерной модели двухниточной черновой группы клетей непрерывного мелкосортного стана, которая позволит исследовать изменение величины натяжения.*

**Ключевые слова:** непрерывный мелкосортный стан, двухниточная прокатка, черновая группа клетей, модель, натяжение, вытяжка, уширение.

### **Введение**

Черная металлургия и прокатное производство неразрывно связаны с авиастроением в Украине. Металлопрокат находит широкое применение: от мелкосортного профиля для пластин коллекторов в электродвигателях до листового проката для изготовления обшивки и корпусов агрегатов. На сегодняшний день в Украине существуют проблемы, связанные с такой важной и значимой отраслью народного хозяйства, как прокатное производство. Это проблемы экономического, производственного характера, вопросы повышения качества продукции, напрямую связанные с эксплуатационным состоянием машин и агрегатов металлургического производства, так как их характеристики влияют на показатели качества продукции и производительность в целом. При производстве мелкосортного проката существуют жесткие требования к сокращению потерь металла в виде обрезки, что невозможно без применения автоматических и автоматизированных систем. Основными задачами, которые решает автоматизация непрерывных мелкосортных станов (НМС), являются настройка и поддержание рациональных режимов ведения технологического процесса, а также минимизация потерь металла.

### **Состояние вопроса и постановка задачи**

Потери металла в обрезь связаны с нестабильностью геометрических размеров сечения мелкосортного проката, что обусловлено как влия-

нием значительного количества технологических возмущений (изменение температуры, размеров и механических свойств заготовки по длине), так и нерациональной настройкой прокатного оборудования и скоростного режима в группах клетей мелкосортного стана.

При производстве мелкосортных профилей на НМС наиболее эффективным каналом управления размерами проката является корректировка скоростного режима прокатки [1]. Непрерывные станы с индивидуальным управлением скоростным режимом прокатки значительно расширяют технологические возможности управления скоростью прокатки в каждой клетке, что стабилизирует работу стана и способствует росту его производительности.

Анализ литературных источников показывает, что исследователи уделяют наибольшее внимание проблемам управления скоростным режимом односточных чистовых групп клетей [1, 2]. Значительно меньше изучены вопросы управления скоростным режимом прокатки в двухниточной черновой группе клетей. Вместе с тем оценка величины натяжения в черновой группе клетей позволит осуществить корректировку скоростного режима и таким образом минимизировать нестабильность величины площади поперечного сечения подката на входе в чистовую группу клетей.

Сложность разработки такого способа оценки заключается в отсутствии соответствующих измерителей фактических размеров проката и

величины натяжения [3]. В связи с этим актуальной задачей является разработка компьютерной модели двухниточной черновой группы клетей непрерывного мелкосортного стана, которая позволит исследовать изменение величины натяжения. Данные об изменении величины натяжения позволяют скорректировать скоростной режим прокатки, уменьшить разнотолщинность проката и сократить количество обрези.

**Основное содержание исследований**

При разработке математической модели использовались упрощенные уравнения для моделирования процесса прокатки на сортовых станах [4]. Реализация модели выполнена на основе структурного моделирования работы семи клетей двухниточной черновой группы НМС 250-1 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

Схема модели двухниточной черновой группы клетей представлена тремя группами взаимосвязанных блоков-подсистем (рис. 1): первая группа блоков (MLi) вычисляет геометрические ( $h_{1i}$  и  $b_{1i}$ ), кинематические ( $M_i$  и  $V_{1i}$ ) и энергосиловые ( $T_{1i}$  и  $P_{1i}$ ) параметры прокатки в семи клетях ( $i$ -номер клетки), вторая группа (RLi,i+1) реализует расчет параметров натяжения ( $\sigma_{ij}$ ), температуры ( $T_{0j}$ ) и изменения геометрических размеров сечения металла ( $h_{0j}$  и  $b_{0j}$ ) в межклетевых промежутках.

С помощью третьей группы блоков (EDi) в модели определяются параметры работы главных электроприводов прокатных клетей, при этом выходное значение частоты вращения привода  $n_i$  используется для расчета скорости деформации в блоках MLi. Для задания значений температуры и размера заготовки используется отдельный блок BBI.

Для моделирования динамики процесса деформации проката в  $i$ -й клетке на вход блоков MLi подаются следующие переменные: геометрические размеры (ширина  $b_{0i}$ , высота  $h_{0i}$ ) и температура подката  $T_{0i}$ , переднее и заднее натяжение проката  $\sigma_{ij}$ , а также частота вращения  $n_i$  привода клетки и зазор между валками  $Z_i$ . Выходными переменными подсистемы MLi являются геометрические размеры (ширина  $b_{1i}$ , высота  $h_{1i}$ ) и температура проката  $T_{1i}$  на выходе из  $i$ -й клетки, скорость металла на входе  $V_{0i}$  и выходе  $V_{1i}$  клетки, а также момент  $M_i$  прокатки. Процесс вычисления в модели реализуется в режиме реального времени, однако полную картину изменения натяжения и уширения полосы можно получить после её выхода из последней клетки черновой группы.

В качестве постоянных параметров в блоках MLi задаются передаточное число редуктора  $j_i$ , радиус валков  $R_i$  и модуль жесткости клетки  $M_{ki}$ . Расчет основных технологических параметров процесса прокатки в модели выполняется на основе фундаментальных зависимостей, приведенных в работе [4].

Расчет параметров и моделирование работы главного привода каждой из семи клетей черновой группы реализуется в блоках EDi. Главный привод  $i$ -й прокатной клетки представлен двигателем постоянного тока с независимой катушкой возбуждения и системой подчиненного регулирования [3].

Расчет межклетевых усилий и удельного натяжения металла в промежутках между клетями  $i$ -й и  $(i+1)$ -й, а также текущих геометрических размеров проката в математической модели осуществляется в подсистемах RLi,i+1 (см. рис. 1).

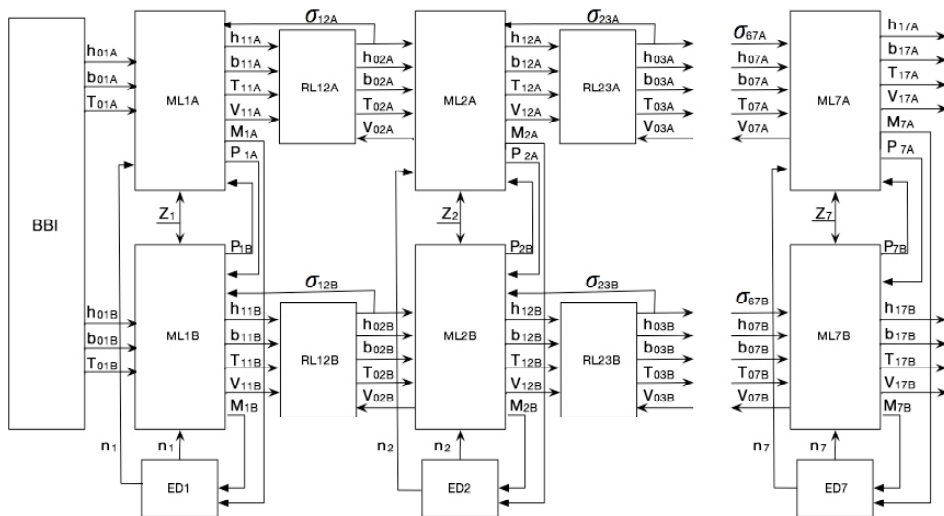


Рис. 1. Структурная схема модели двухниточной черновой группы клетей НМС

Входными переменными блоков  $RL_{i,i+1}$  являются скорость, геометрические размеры и температура проката на выходе из предыдущей клетки, а также скорость прокатки на входе в следующую клетку. Выходные расчетные параметры подсистем  $RL_{i,i+1}$ : удельное натяжение, геометрические размеры и температура проката на входе в следующую клетку. С учетом данных работ [5] и [6] изменение удельного натяжения полосы между соседними клетками реализовано в модели инерционным звеном первого порядка.

Сила натяжения  $\sigma_{i,i+1}$  связана с относительным рассогласованием скоростей концевых сечений прутка  $\Delta v_{i,i+1}$  соотношением:

$$\sigma_{i,i+1}(t) = E \cdot \Delta v_{i,i+1} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{V_{0,i+1} \cdot t}{L_0}\right) \right], \quad (1)$$

где  $\Delta v_{i,i+1}$  – рассогласование скоростей концевых сечений прутка,  $L_0$  – длина прутка,  $V_{0,i+1}$  – скорость прутка на входе в последующую клетку.

В выражении (1) используется модуль упругости  $E$ , значение которого существенно зависит от температуры металла:

$$E = 16,7 \cdot 10^4 - 57,1 \cdot \frac{T_{0,i+1} + T_{1,i}}{2}, [\text{Н/мм}^2], \quad (2)$$

где  $T_{1,i}$  – температура прутка на выходе из предыдущей клетки,  $T_{0,i+1}$  – температура прутка на входе в последующую клетку.

Прокатка в двухниточной черновой группе, отличается от одностичной, тем, что на геометрические размеры прокатки влияет количество прокатываемых ниток. Взаимное влияние смежных прокатных нитей моделируется по методике работы [7] (рис. 1).

Общий вид компьютерной модели двухниточной черновой группы клеток НМС 250-1 представлен на рисунке 2.

Для исследования изменения натяжения проката рассматривались две величины: коэффициент вытяжки  $\lambda$  и уширения  $\xi$  проката. Первичная настройка модели осуществлялась в отсутствие возмущений по размерам и температуре заготовки. При этом заданные частоты вращения прокатных двигателей подбирались таким образом, чтобы обеспечить минимальные значения натяжения от 5 до 10 Н/мм<sup>2</sup>. В результате моделирования прокатки круглого профиля  $\varnothing 10$  мм в двухниточной черновой группе клеток непрерывного мелкосортного стана 250-1 были получены осциллограммы изменения геометрических, кинематических и энергосиловых параметров прокатки. Ниже, в качестве примера, приведены кривые изменения натяжения (рис. 3) и вытяжки (рис. 4) проката в последнем межклетевом промежутке.

Поскольку на модели сложного, многосвязного объекта постановка экспериментов из-за очень большого числа технологических параметров, значимо влияющих на ход и результаты процессов невозможна, а значительная часть этих параметров не поддается измерению, единственным возможным выходом из описанной ситуации является сопоставление качественных и количественных эффектов взаимного влияния различных моделируемых параметров с аналогичными эффектами, наличие которых однозначно установлено на практике и подтверждается опытом промышленной эксплуатации объекта автоматизации.

Анализ полученных при моделировании процесса прокатки в двухниточной черновой группе клеток НМС результатов показывает, что геометрические (ширина, обжатия, вытяжка), кинематические (опережение, скорость прокатки) и энергосиловые (момент прокатки) параметры соответствовали значениям, наблюдаемым на практике.

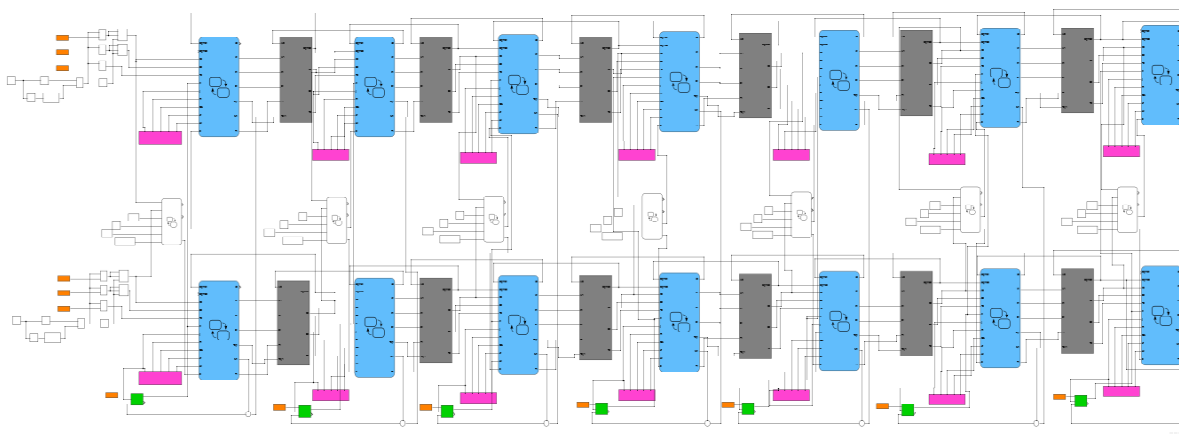


Рис. 2. Структура компьютерной модели двухниточной черновой группы клеток НМС

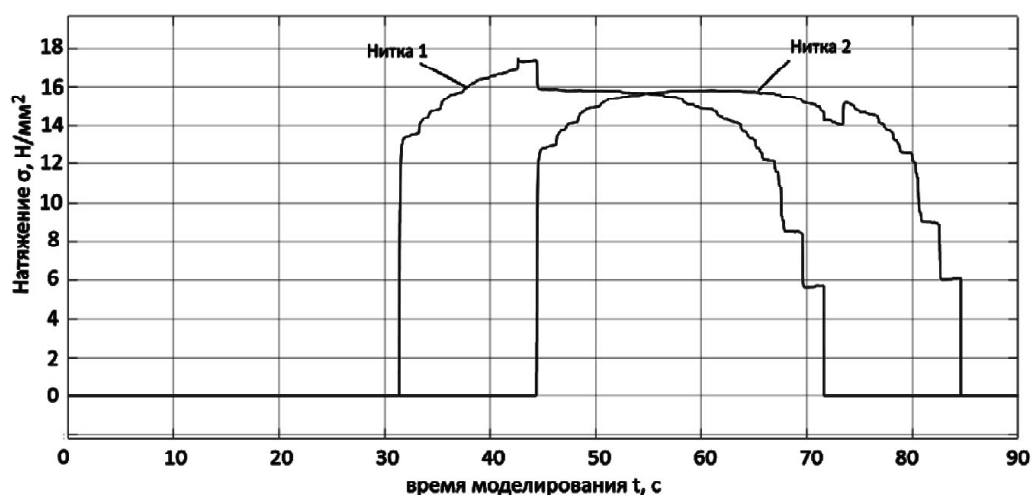


Рис. 3. График изменения натяжения проката в каждой нитке



Рис. 4. График изменения вытяжки проката в каждой нитке

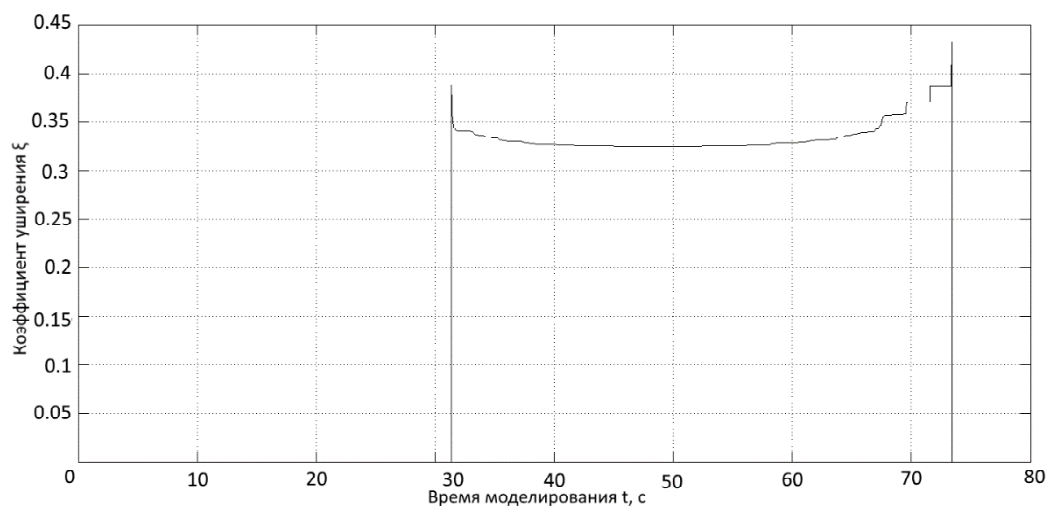


Рис. 5. График изменения коэффициента уширения проката

К числу таких эффектов следует отнести:

- «лыжеобразный» характер изменения горизонтального размера проката на выходе из чистой клетки (рис. 5), связанный с отсутствием переднего натяжения в период заполнения состояния и заднего натяжения в период его освобождения заготовкой с большим утолщением на заднем конце раската вследствие более сильного воздействия заднего натяжения;

- ожидаемые изменения межклетевых усилий и поперечных размеров проката при появлении и исчезновении смежной заготовки в соседней прокатной нитке.

Наличие указанных эффектов, по мнению авторов, свидетельствует об адекватности модели реальному объекту и позволяет утверждать, что созданная динамическая модель с достаточной достоверностью описывает процесс прокатки на НМС250-1 и может быть использована как для исследовательских целей, так и для апробации новых технических решений по автоматическому управлению.

#### **Выводы и перспективы дальнейших исследований**

Разработана компьютерная модель процесса прокатки в двухниточной черновой группе клетей НМС 250-1 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Полученные данные об изменении суммарной вытяжки и коэффициента уширения проката на выходе из черновой группы клетей, а также сопоставление качественных и количественных эффектов взаимного влияния различных моделируемых параметров с аналогичными эффектами, наличие которых однозначно установлено на практике и подтверждается опытом промышленной эксплуатации объекта автоматизации, позволяет считать полученную модель адекватной реальному объекту. Данная модель позволит провести исследования изменения натяжения проката. Результаты таких исследований представляют интерес для решения сложной за-

дачи регулирования скоростного режима прокатки, что позволит минимизировать разнотолщинность проката и сократить потери металла в обрезь.

#### **Список литературы**

1. Системы регулирования межклетевых усилий на однониточных сортовых прокатных станах / М. П. Пустыльник, В. Н. Куваев, А. П. Егоров // АСУТП и средства автоматизации черной металлургии на базе микропроцессорной техники. – М. : Металлургия, 1986. – С. 74–79.
2. Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах: монография / А. С. Бешта, В. Н. Куваев, О. Е. Потап, А. П. Егоров. – Днепропетровск : Журфонд, 2014. – 283 с., ил.
3. Потап О. Е. Информационное обеспечение системы принятия решений о качестве настройки режима прокатки в черновой группе клетей мелкосортного стана / Потап О. Е., Егоров А. П., Меледин Н. В. – Донецьк : ЛАН-ДОН-XXI, 2013. – С. 315–323.
4. Егоров В. С. Упрощенные уравнения для моделирования процесса прокатки на сортовых станах / В. С. Егоров, О. Е. Потап. – Днепропетровск, 1985. – 19 с.
5. Егоров В. С. Передаточные функции сил натяжения полосы в межклетевых промежутках непрерывного прокатного стана : Депонированная рукопись / Егоров В. С., Стахно В. И., Потап О. Е. – М. : Черметинформация, 1984 – № 2642. – 19 с.
6. Егоров В. С. Модель передачи межклетевых усилий по стану при непрерывной сортовой прокатке / В. С. Егоров, О. Е. Потап // Теоретические проблемы прокатного производства : тез. докл. IV Всесоюз. науч.-техн. конф., Ч. I. – Днепропетровск, 1988. – С. 203–205.
7. Егоров А. П. Математическая модель клетки при двухниточной прокатке / Егоров А. П., Егоров В. С. // Теория и прокатка металлургии. – Днепропетровск, 1999. – С. 57–59.

*Поступила в редакцию 19.05.2017*

#### **Миронов О.М., Егоров О.П., Потап О.Ю., Тригуб І.Г. Моделивання процесу прокатки в двонитковій чорновій групі клітей безперервного дрібносортового стану**

*При виробництві дрібносортних профілів втрати металу в обрізь пов'язані з нестабільністю геометричних розмірів площі поперечного перерізу дрібносортового прокату, що обумовлено нераціональним налаштуванням швидкісного режиму прокатки. Разом з тим оцінка величини натягу прокату дозволить здійснити коригування швидкісного режиму і таким чином мінімізувати нестабільність площі поперечного перерізу підкату на вході в чистову групу клітей. Складність розробки такого способу оцінки полягає у відсутності відповідних вимірювальних засобів розмірів прокату і величини натягу. У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка комп'ютерної моделі двониткової чоргової групи клітей безперервного дрібносортового стану, яка дозволить досліджувати зміну величини натягу.*

**Ключові слова:** безперервний дрібносортний стан, двониткова прокатка, чорнова група клітей, модель, натяг, витяжка, уширення.

**Mironov A., Egorov A., Potap O., Trigub I. Modeling of the rolling process in a two-cotton black group of continuous small-section mill**

*In the production of small-profile profiles, metal losses are associated with instability of the geometric dimensions of the section of small-section rolled products, which is caused by inefficient adjustment of the rolling speed regime. At the same time, estimating the tension of the rolled product will allow for the adjustment of the speed regime and thus minimize the instability of the cross-sectional area of the rolling stock at the entrance to the final group of stands. The complexity of developing such a valuation method lies in the absence of appropriate measuring means for the dimensions of rolled products and the magnitude of the tension. In this regard, the actual task is to develop a computer model of a two-thread roughing group of stands of a continuous small-section mill, which allows to explore the change in the tension value.*

**Key words:** *continuous small-section mill, double-strand rolling, roughing group of stands, model, tension, stretching, broadening.*