

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОКАТКЕ МЕТАЛЛОВ НА СТАНЕ 300

С.И. Малафеев (ООО Компания «Объединенная Энергия»),

А.А. Малафеева, В.И. Коняшин (ВлГУ)

Приводятся результаты разработки модели процессов в мехатронной системе линейного прокатного стана 300 с учетом взаимодействия электрического привода, клетей и деформируемого металла. Модель ориентирована на компьютерное исследование ТП при прокатке нихрома и позволяет анализировать динамические процессы в механической подсистеме, электроприводе и системе электропитания прокатного стана с учетом особенностей прокатываемого сплава, конструкции стана, системы управления электроприводом и типа двигателя.

Ключевые слова: моделирование, прокатный стан, автоматизация, компьютер, деформация, аппроксимация.

Повышение эффективности ТП обработки металлов давлением обеспечивается в настоящее время на основе совершенствования средств и систем автоматического управления, компьютерного моделирования и оптимизации на основе математического описания физических процессов.

Методологической основой исследования процессов при прокатке металлов служит декомпозиция технологической системы и разработка базовых локальных моделей для решения конкретных задач, в том числе моделей приводного двигателя и упругих систем клетей, технологической нагрузки, зазоров в механических передачах, взаимодействия смежных клетей через полосу и др. Такой подход позволяет эффективно решать частные задачи, но не обеспечивает адекватное исследование процессов в системе с учетом сложных взаимодействий. В настоящее время разработаны и используются математические модели процессов прокатки, базирующиеся на механике сплошной среды, теориях упругости и пластичности [1, 2]. Для исследования формоизменения металла в валках разработаны программные комплексы Deform, QForm, Ansys, Forge и др. В этих комплексах прокатываемый материал и инструмент (рабочие валки) рассматриваются как некоторые сплошные среды с определенными физическими свойствами (термоупругопластические свойства прокатываемого материала, термоупругие свойства валков и пр.). На основании этих свойств составляются соответствующие уравнения, для решения которых используется метод конечных элементов. Такие программные системы ориентированы на производственные вычислительные системы.

Проектирование электроприводов производится на основе данных о технологических нагрузках при прокатке [3]. При этом нагрузка электродвигателя представляется постоянной величиной, в некоторых случаях применяется зависимость момента нагрузки от скорости или угла закручивания валков. Формирование усилия прокатки и момента

на валках рассматривается без учета взаимосвязи динамических процессов в упругой системе клетки и системе электропривода.

Сложность системного исследования процессов в системе прокатного стана обусловлена, во-первых, различием временных масштабов быстрых деформационных и относительно медленных электромеханических процессов и, во-вторых, нелинейным специфическим характером формирования динамических нагрузок при прокатке. Современная мехатронная технология исследования и проектирования технологических систем прокатки предполагает разработку и использование новых моделей, в том числе мультимасштабных и междисциплинарных.

В настоящей работе представлены результаты разработки модели процесса прокатки на линейном стане 300, ориентированной на компьютерное исследование обработки нихрома. Предложенная модель позволяет исследовать динамические процессы в механике и электроприводе линейного прокатного стана с учетом особенностей прокатываемого сплава, конструкции прокатного стана, примененного электропривода и системы управления.

Математическое описание процессов в мехатронной системе построено на основе:



Рис. 1. Функциональная схема моделирования процессов при прокатке

- классических уравнений электромеханики, описывающих процессы в приводном двигателе;
- уравнений электромагнитных процессов в системе электропитания;
- аналитических уравнений обработки информации в системе управления;
- уравнений, описывающих деформационные процессы при прокатке.

При этом обеспечивается учет взаимосвязей процессов в электрической системе, электромеханическом преобразователе и деформируемом металле. Нагрузка привода в процессе прокатки вычисляется с использованием уравнений деформации металла в зависимости от угловой скорости валков, температуры слитка, характеристик прокатываемого металла и параметров стана.

На рис. 1 показана функциональная схема компьютерного моделирования процессов при прокатке. При составлении модели электропривода линейного стана, состоящего из пяти клетей, использовано классическое математическое описание приводного двигателя постоянного тока с независимым возбуждением [4]. Линия прокатного стана представлена 6-массовой моделью с упругими связями и зазором в передаче между двигателем и первой клетью. Рабочая клеть прокатного стана представлена в виде двухмассовой упругой системы. Нагрузка привода в процессе прокатки вычисляется с использованием упрощенных уравнений деформации металла. В модели по заданной угловой скорости валка, которая вычисляется по модели электромеханической системы прокатного стана, определяется положение нейтрального сечения. По положению этого сечения вычисляется распределение контактных сил трения скольжения между прокатом и валками и момент прокатки. Влияние технологических факторов прокатки — обжатие за проход, температура, скорость прокатки и зазор между валками учитываются при вычислении распределения сил трения скольжения и среднего по очагу деформации предела текучести.

Для определения момента прокатки (для одной клетки) используется соотношение:

$$M = 2p\psi bR(h_0 - h_1), \quad (1)$$

где  $b$  — ширина слитка;  $\psi$  — коэффициент плеча момента ( $\psi \approx 0,5$ );  $p$  — среднее контактное давление металла на валки;  $h_0, h_1$  — высота слитка до и после прокатки. Величина среднего контактного давления для выражения (1) определяется по формуле А. И. Целикова [5]:

$$\begin{cases} p = \sigma_T^* \frac{1}{(h_0 - h_1)} \frac{h_\gamma}{\delta} \left[ \left( \frac{h_0}{h_\gamma} \right)^\delta + \left( \frac{h_1}{h_\gamma} \right)^\delta - 2 \right]; \\ \delta = \frac{\mu}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \end{cases}$$

где  $h_0, h_1$  — высота слитка до и после прокатки,  $h_\gamma$  — высота слитка в нейтральном сечении,  $\sigma_T^*$  — средний предел текучести,  $R$  — радиус валков,  $\mu$  — коэффициент трения,  $\alpha$  — угол захвата.

Для определения высоты слитка в нейтральном сечении используются уравнения:

$$\begin{cases} V_B \cos \gamma = \frac{V_0 h_0}{h_\gamma}; \\ h_\gamma = h_1 + 2R(1 - \cos \gamma) \\ h_1 \leq h_\gamma \leq h_0. \end{cases} \quad (2)$$

Решением системы уравнений (2) при  $h_1 \leq h_\gamma \leq h_0$  является выражение:

$$h_\gamma = \frac{(2R + h_1) - \sqrt{(2R + h_1)^2 - \frac{8RV_0 h_0}{V_B}}}{2}.$$

Отсутствие решения системы (2) означает, что нейтральное сечение отсутствует и возможны две ситуации: очаг деформации состоит либо только из зоны отставания  $h_\gamma = h_1$ , либо только из зоны опережения  $h_\gamma = h_0$ .

Условия для зоны опережения:

$$\begin{cases} (2R + h_1)^2 - \frac{8RV_0 h_0}{V_B} > 0; \\ h_\gamma < h_1; \\ (2R + h_1)^2 - \frac{8RV_0 h_0}{V_B} < 0; \\ V_B \cos(\alpha) > V_0. \end{cases}$$

Условия для зоны отставания:

$$\begin{cases} (2R + h_1)^2 - \frac{8RV_0 h_0}{V_B} > 0; \\ h_\gamma > h_0; \\ (2R + h_1)^2 - \frac{8RV_0 h_0}{V_B} < 0; \\ V_B \cos \alpha < V_0. \end{cases}$$

где  $V_B$  — линейная скорость валка,  $V_0$  — скорость слитка на входе в клеть.

Распределение степени  $\varepsilon$  и скорости  $\varepsilon'$  деформации по очагу деформации определяется по соотношениям [5]:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1 + 2R(1 - \cos \phi)}{h_0}; \\ \varepsilon' = \frac{2V_0 h_0 \operatorname{tg} \phi}{h_\phi^2}. \end{cases}$$

Зависимость предела текучести от степени деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $\varepsilon'$  и температуры  $T$  для нихрома аппроксимируется эмпирической формулой [6]:

$$\sigma(\varepsilon, \varepsilon') = a(T) + b(T) \cdot \ln(\varepsilon) + c(T) \cdot \ln(\varepsilon'), \quad (3)$$

где  $a(T)$ ,  $b(T)$  и  $c(T)$  — коэффициенты, линейно зависящие от температуры.

С учетом (3) среднее по очагу деформации значение предела текучести определяется по формуле:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma(\phi) &= a + b \ln \left( \frac{h_0 - h_1 + 2R(1 - \cos \phi)}{h_0} \right) + \\ &+ c \ln \left( \frac{2V_0 h_0 \operatorname{tg} \phi}{h_\phi^2} \right); \\ \sigma_T^* &= \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha \sigma(\phi) d\phi. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Формула (4) справедлива при расчете среднего предела текучести за один проход. Известно, что при прокатке температура заготовки изменяется: из-за пластических деформаций металл разогревается, а при транспортировке от одной клетки к другой охлаждается. Скорректированное значение температуры металла на новом проходе подставляется в (4).

При прокатке рабочая клетка испытывает упругие деформации (они складываются из деформаций рабочих валков, станины, нажимных винтов и пр.). Это приводит к перераспределению нагрузок в очаге деформации. Величина смещения валков от исходного положения определяется из уравнения:

$$\left\{ \begin{aligned} 0,5m \frac{d^2 y}{dt^2} &= F_h - 9,81m - 0,5c_k y; \\ F_h &= pbR \sqrt{h_0 - h_1}, \end{aligned} \right.$$

где  $y$  — величина отклонения;  $m$  — масса валка;  $c_k$  — жесткость рабочей клетки;  $F_h$  — усилие прокатки;  $b$  — ширина слитка;  $R$  — радиус валка;  $p$  — среднее контактное давление металла на валки;  $h_0$ ,  $h_1$  — высота слитка до и после прокатки.

Высота слитка после прокатки  $h_1$  определяется по формуле

$$h_1 = h_1^* + y,$$

где  $h_1^*$  — раствор валков до начала прокатки. Значение  $h_1$  учитывается при расчете среднего контактного давления на валки (рассчитывается итерационно).

Проверка разработанной модели мехатронной систе-

мы прокатного стана выполнена путем сравнения результатов, полученных при имитации прокатки, с результатами экспериментальных исследований процессов прокатки нихрома (сплав X20H80) на Владимирском заводе прецизионных сплавов. При проверке сравнивались процессы изменений токов и напряжений в электроприводе при выполнении технологического цикла. В электроприводе предусмотрена возможность передачи в компьютер сигналов тока и напряжения через UART с использованием контроллера ARDUINO UNO. В среде MATLAB реализовано пользовательское приложение, осуществляющее обработку данных, полученных от Arduino UNO.

Для количественного сравнения экспериментальных и модельных диаграмм рассчитывались коэффициенты детерминации. Для различных условий прокатки, включая пробуксовки, получены значения коэффициента детерминации в диапазоне 0,85...0,98.

Для действующих значений токов якорной обмотки двигателя, полученных усреднением за технологический цикл, расхождение экспериментальных и модельных значений во всех экспериментах не превысило 8%.

Рассмотренная модель процесса прокатки позволяет исследовать электромеханические и деформационные процессы с использованием типового инструментария MATLAB. В среде MATLAB реализована Simulink-модель, функционально содержащая 6 подсистем: модель электродвигателя, модель силовой части электропривода, модель системы управления, модель линии прокатного стана, модель рабочих клеток прокатного стана и модель нагрузки. Дифференциальные уравнения динамических моделей представлены в операторной форме и реализованы в среде MATLAB с использованием блока Transfer fcn.

Математическое описание, основанное на синергетическом объединении моделей электропривода, механических рабочих органов и деформационных процессов металла, адекватно отражает взаимодействие электропривода и технологической нагрузки и позволяет исследовать процессы прокатки с учетом

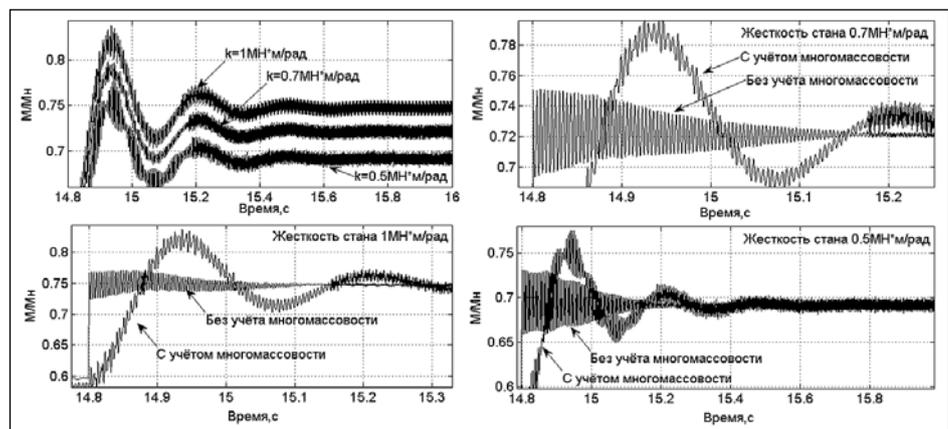


Рис. 2. Влияние многомассовости и упругости прокатного стана на момент прокатки (крутящий момент)  $M$ ,  $M_h$  — номинальное значение момента

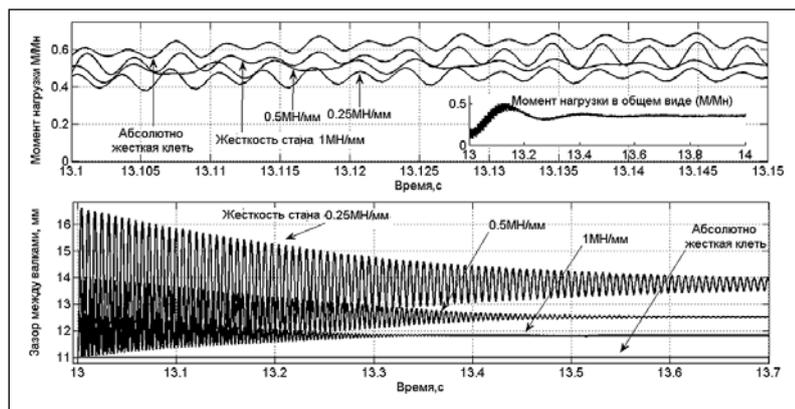


Рис. 3. Влияние жесткости рабочей клетки на момент прокатки и зазор между валками

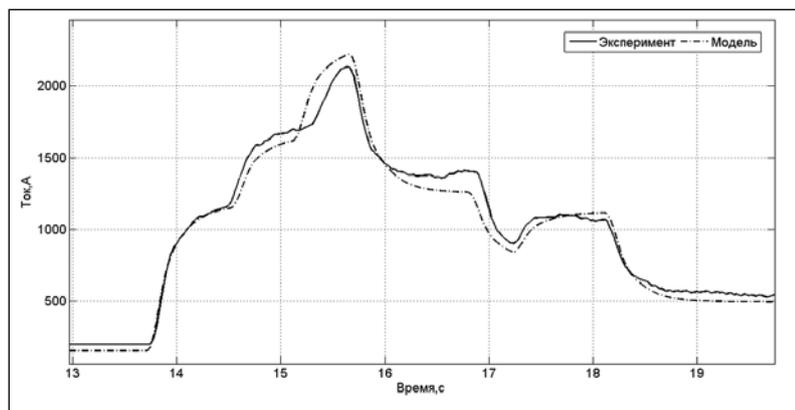


Рис. 4. Ток якоря приводного двигателя при прокатке (модель и эксперимент)

особенностей приводной системы, характеристик рабочих клеток, свойств и температуры металла.

Модель успешно применена на Владимирском заводе прецизионных сплавов при проектировании

**Малафеев Сергей Иванович** — д-р техн. наук, проф., действительный член Международной энергетической академии, главный научный сотрудник ООО Компания «Объединенная Энергия»,

**Малафеева Алевтина Анатольевна** — д-р техн. наук, проф., **Коняшин Владимир Игоревич** — аспирант Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.

Контактные телефоны: (495) 558-88-18, (4922) 361-536.

E-mail: sim\_yl@nm.ru.

### Период тестовой эксплуатации системы M-Max 400 ST/USO близок к завершению

Компания MicroMax сообщает, что период тестовой эксплуатации вычислительной системы с повышенной достоверностью обработки информации M-Max 400 ST/USO, разработанной для приложений автоматического управления движением железнодорожного транспорта, близок к завершению.

Проект модернизации системы автоблокировки и железнодорожной сигнализации, реализуемый ОАО «НИИАС» совместно с MicroMax, в котором одной из важнейших составляющих является защищенная вычислительная система с повышенной достоверностью обработки информации M-Max 400 ST/USO, готовится перейти к следующему этапу. Период тестовой эксплуатации подходит к завершению, система показывает успешные результаты и полностью оправдывает ожидания в эффективности заложенных решений.

M-Max 400 ST/USO — часть программно-аппаратного комплекса передачи данных по радиоканалу о состоянии светофоров на перегонах по пути следования локомотива. Использование этого независимого комплекса позволяет машинисту получать данные о состоянии большого числа блокучастков на перегоне и станции в дополнение к штатной системе автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и заранее принимать решения о темпе движения состава. Так достигаются более высокая средняя скорость

движения и меньшее число торможений и разгонов состава, экономится электроэнергия на тягу поездов.

Усовершенствования системы АЛС позволяют увеличить пропускную способность железнодорожного движения на 10% без значительных изменений в подвижном составе и существенных вложений в инфраструктуру. Система с повышенной достоверностью обработки информации M-Max 400 ST/USO — компактная защищенная вычислительная система для бортовых и стационарных приложений, построенная, чтобы отвечать требованиям CENELEC SIL4. Две идентичные подсистемы с собственными процессорными модулями и источниками бесперебойного питания объединены в одном корпусе через внутренний интерфейс. Подсистемы циклично синхронизируются, обмениваются данными и выполняют последовательность перекрестных проверок. Внутренние источники бесперебойного питания обеспечивают резерв до 70 секунд работы системы при пропадании внешнего электроснабжения. Весь этот комплекс аппаратных и программных решений позволяет достоверно передавать по радиоканалу данные и повысить эффективность железнодорожных перевозок. Следующим этапом на пути модернизации систем АЛС должна стать программа внедрения разработанных решений.

[Http:// micromax.com](http://micromax.com)

ТП, выборе режимов работы оборудования, сравнительном анализе структур приводов и настроек регуляторов, исследовании упругих колебаний и разработке способов их демпфирования [7]. На рис. 2 приведены примеры результатов моделирования изменения момента прокатки при различных значениях жесткости стана. На рис. 3 показано влияние жесткости рабочей клетки на момент прокатки и зазор между валками; на рис. 4 — осциллограммы токов электродвигателя, зарегистрированные экспериментально и полученные при моделировании.

### Список литературы

1. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. М. Физматлит. 2001.
2. Писаренко Г. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Киев: Наукова думка, 1981.
3. Півняк Г. Г., Бешта О. С., Фількін М. П. Автоматизированый электропривод у прокатному виробництві. Дніпропетровськ, Національний гірничий університет. 2008.
4. Малафеев С. И., Малафеева А. А. Основы автоматизации и системы автоматического управления. М. Академия. 2010.
5. Грудев А. П. Теория прокатки. М. Металлургия. 1988.
6. Малафеев С. И., Коняшин В. И. Аппроксимация характеристики сопротивления деформации нихрома//Производство проката. 2013. № 3.
7. Малафеев С. И., Коняшин В. И. Силы трения при прокатке прецизионных сплавов: компьютерное моделирование//Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 2.