

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
КЛЕТЕЙ ЧЕРЕЗ ПОЛОСУ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ**

Вопросам исследования непрерывной прокатки посвящены фундаментальные работы А.И. Целикова, В.Н. Выдрина, А.П. Чекмарёва, Н.Н. Дружинина, Ю.М. Файнберга, М.А. Беньяковского, П.Н. Полухина, М.Я. Бровмана и др. В них решены основные вопросы квазистационарного процесса, когда возмущение или управляющие воздействия действуют во время непрерывной прокатки.

1. Исследованы закономерности изменения технологических параметров – нейтрального угла, опережения, усилия и момента прокатки, скорости выхода полосы из предыдущей клетки и входа в следующую клетку, межклетевых усилий и др.

2. Исследовано влияние основных возмущений – отклонение температуры и толщины полосы, скорости, эксцентриситета валков и др. на непрерывный процесс прокатки.

3. Разработаны управляющие и регулирующие алгоритмы, положенные в основу систем автоматического регулирования, обеспечивающие стабильность непрерывного процесса и требуемое качество проката.

В основу математических моделей непрерывной прокатки положены известные закономерности и зависимости теории прокатки, многократно проверенные на практике. В связи с этим, вопрос идентификации моделей в большинстве работ не ставится. Показано, что точность моделей непрерывной прокатки, которая описывается системой линейных уравнений в отклонениях, достаточна для практического применения с учётом предельных допустимых возмущений.

Наряду с изложенным подходом, в работах [1-5] решается задача динамического взаимодействия группы клеток непрерывного стана через полосу с учётом упругих крутильных колебаний в линии привода и в клетке. Математическая модель представляется совокупностью полных уравнений непрерывной прокатки и упругих колебаний механических систем. В наибольшей степени колебания, динамические нагрузки и взаимодействие клеток через полосу проявляются в период захвата полосы валками и заполнения полосой непрерывной группы. Здесь решение задачи сводится к определению в переходный период нагрузок в механическом оборудовании, электродвигателе, полосе между клетями и устойчивости процесса прокатки в группе клеток. Однако обзор публикаций показал, что имеется лишь несколько попыток моделирования с учётом 2–3-х клеток непрерывной группы [2, 3]. Вопросу идентификации моделей не уделяется должного внимания.

По сути, задача взаимодействия клеток в отмеченной постановке решалась только для частного случая – квазиустановившегося процесса прокатки, когда группа клеток заполнена полосой [1]. Однако и здесь принят ряд ограничений. В [4] рассматривается только одна i -я клетка в предположении, что скорость выхода полосы из предыдущей $(i-1)$ -й клетки и входа в $(i+1)$ -ю клетку не изменяется при действии возмущения в i -й клетке. В работе [3] не учтено влияние жёсткости полосы в очаге деформации на частоту собственных колебаний упругой системы клетки.

В работе [7] приведено сравнение результатов расчётов для двух клеток с экспериментальными данными, подтвердившее хорошее совпадение колебаний крутящих моментов. В то же время, результаты расчётов межклетевого усилия не приводятся.

Нами разработана математическая модель динамического взаимодействия клеток непрерывной группы через полосу и компьютерная ее реализация с учетом транспортного запаздывания (переноса) возмущений, образующихся на полосе в виде

разнотолщинности [5, 6]. Чтобы убедиться в правильности получаемых решений, идентификации модели и программы выполнили в несколько практических этапов.

1. Настройка установившегося процесса непрерывной прокатки в шестиклетевой группе с заданными межклетевыми натяжениями и температурно-деформационным режимом в клетях. Реализовано два варианта расчета скоростного режима, когда задается скорость прокатки в первой или последней клетке группы. Угловая скорость вращения валков в других клетях последовательно рассчитывается в сторону последней или первой клетки, исходя из условия постоянства секундных объемов металла, проходящих через клетки:

$$\omega_{i+1} = \omega_i \frac{r_i}{r_{i+1}} \cdot \frac{1 + S_{0i} - a \cdot \epsilon_3 - T_n \cdot \lambda_i}{1 + S_{0i+1} - b \cdot \epsilon_3 - T_n \cdot \lambda_{i+1} \cdot \lambda_{i+1}}$$

Здесь S_0 – опережение при свободной прокатке, T – заданные межклетевые натяжения, переднее (n) и заднее ($з$), a , b – коэффициенты, r – радиусы валков, λ – коэффициент вытяжки.

В результате по известным зависимостям рассчитываются все параметры прокатки – от очага деформации до усилия и момента прокатки и главного привода. Постоянство параметров во времени свидетельствует о стационарном (установившемся) режиме прокатки с заданными межклетевыми натяжениями и толщиной полосы на выходе из группы клетей. В результате проверяется также правильность программирования принятых зависимостей.

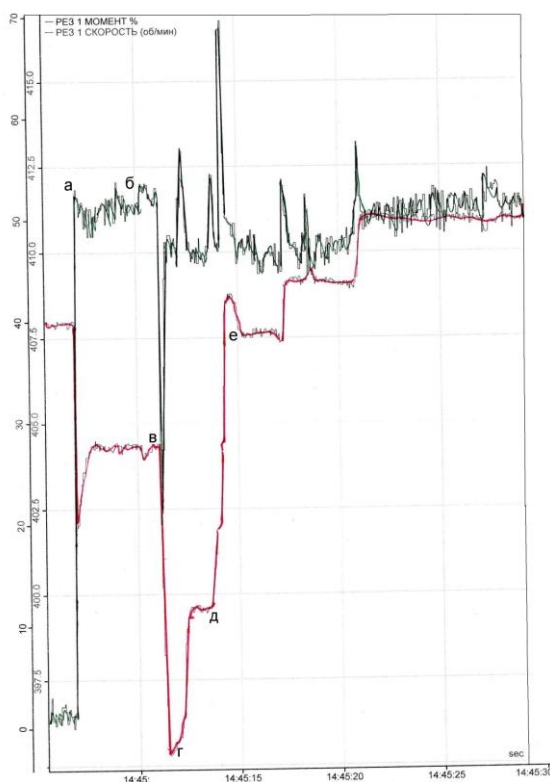


Рис. 1. Изменение момента и частоты вращения главного привода первой клетки (№ 5) непрерывной группы стана 1680 при захвате полосы валками этой клетки – «а», затем второй клетью (№ 6) – «б», и при регулирующих воздействиях оператора – «в», «г», «д», «е»

2. Второй этап идентификации состоит в задании возмущений в систему во время установившегося процесса прокатки в непрерывной группе и определения реакции оборудования и параметров. Например, быстрое перемещение нажимных винтов в одной из клетей или небольшое изменение частоты вращения двигателя (скорости прокатки). Последнее наблюдается на стане 1680 при вмешательстве в

процесс регулирования оператора чистовой группы (рис. 1). После захвата полосы валками первой клетки (№ 5) и уменьшения скорости двигателя на 7 % режим прокатки установился. Кратковременное уменьшение скорости (на 17 %) и последовавшие на неё воздействия вызвали соответствующие изменения момента двигателя. Это отразилось на реакции механической системы линии главного привода в виде колебаний момента сил упругости (рис. 2). Детальное рассмотрение участков позволило установить, что колебания момента совпадают с частотой собственных колебаний линии привода (рис. 3).

Моделирование аналогичного воздействия на скорость показало идентичность расчетной реакции линии привода (рис. 4) и фактической, а также представить характер изменения момента двигателя, момента сил упругости и натяжения T_{56} между клетями 5 и 6, которое не измеряется.

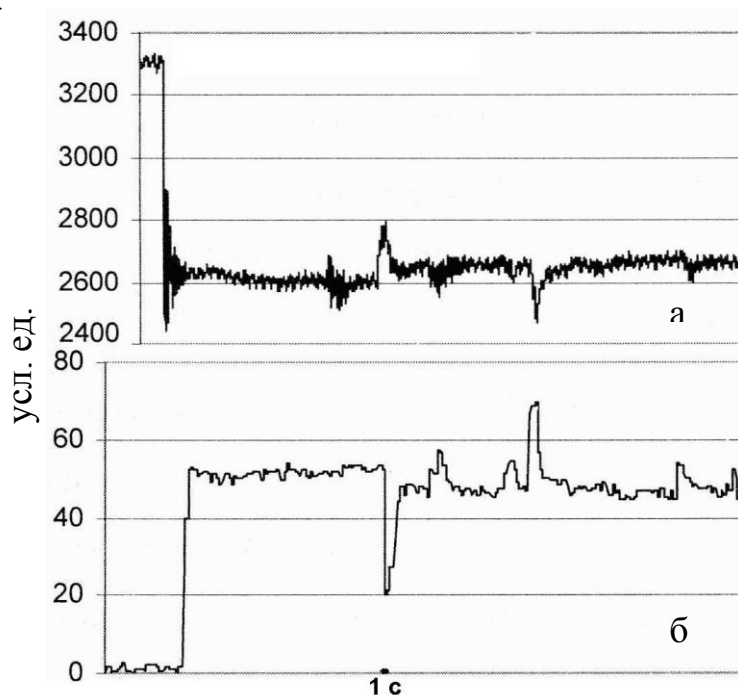


Рис. 2. Совместное измерение момента сил упругости (а) и момента главного привода (б) в клетях 5

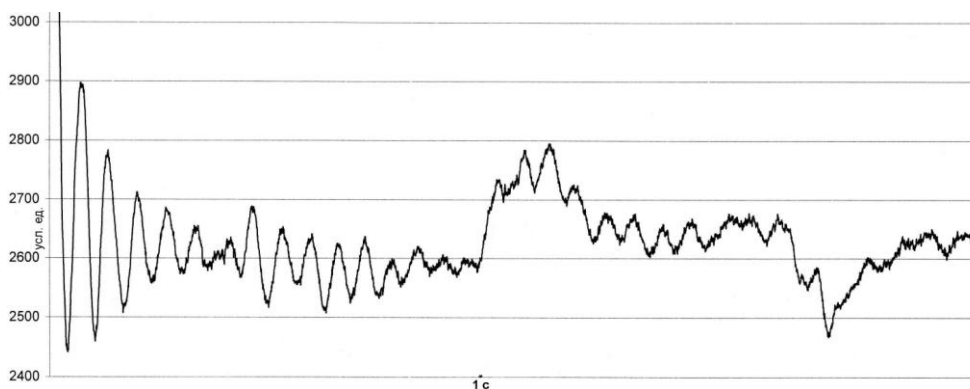


Рис. 3. Подробное представление начального участка колебаний момента сил упругости, показанного на рис. 2,а

Кроме этого, выполнили сравнение переходных процессов, полученных с помощью разработанной модели и моделей в работе [1]. Так, при перемещении нажимных винтов колебания упругой системы клетки, равносильно и отклонения толщины полосы на выходе, и опережения, соответствуют частоте (рис. 5), определяемой по зависимости, в которой учитывается не только жесткость клетки, но и жесткость полосы в очаге деформации [8]. В работах [1-3] этот момент не отмечается.

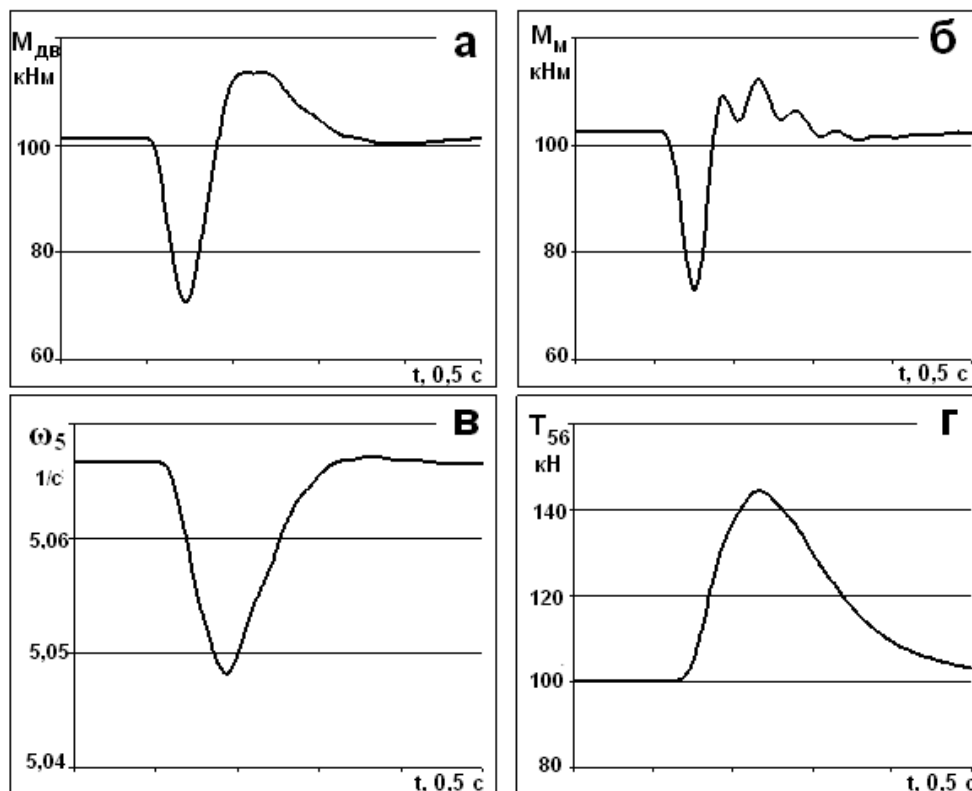


Рис. 4. Момент (а) и частота вращения (в) главного привода, момент сил упругости (б) и межклетевое натяжение (г) при моделировании воздействия на частоту вращения двигателя в установившемся режиме прокатки (клеть 5)

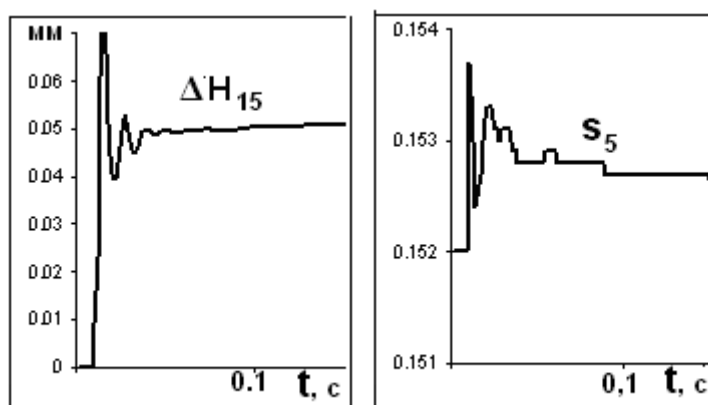


Рис. 5. Колебания толщины полосы на выходе из клетки 5 и опережения при задании отклонения входной толщины в клеть 5 во время непрерывной прокатки

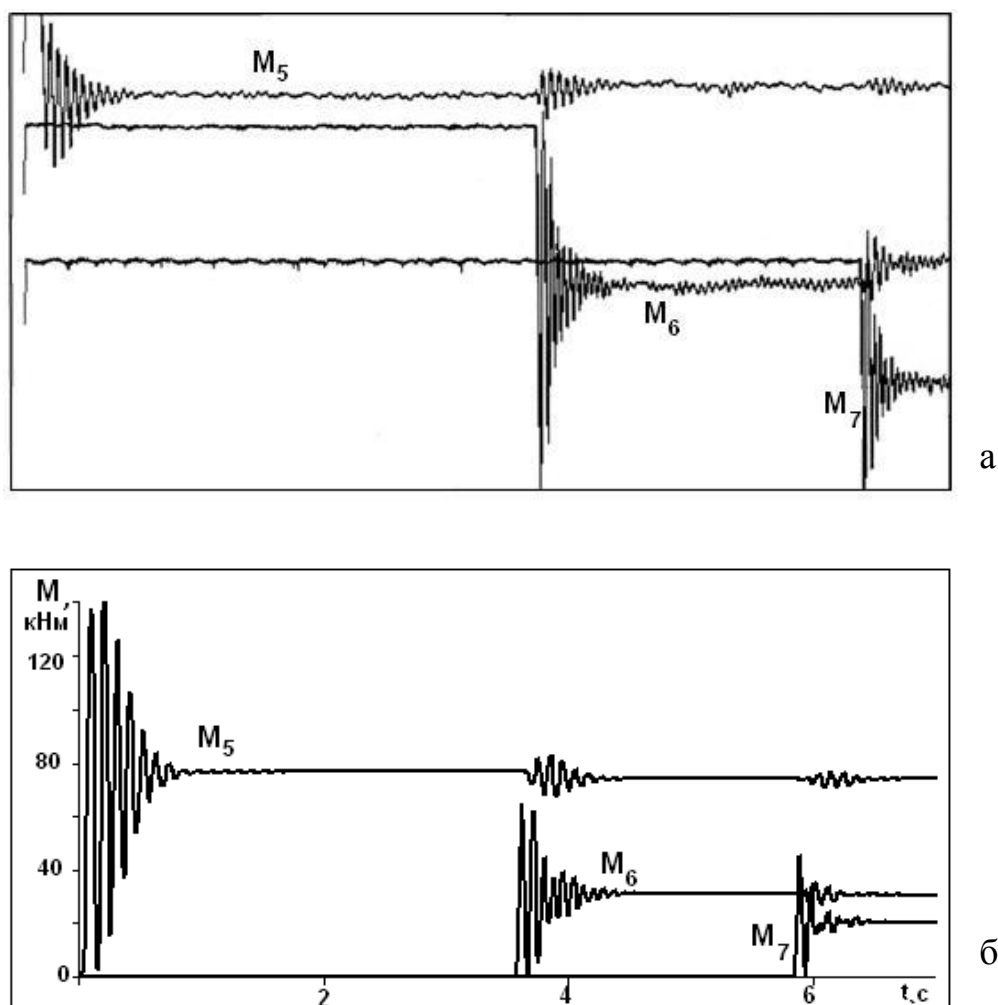


Рис. 6. Взаимосвязь колебаний момента сил упругости в главных линиях клетей 5, 6 и 7: а - измерения, б – моделирование.

3. Третий, наиболее полный, этап состоит в моделировании динамики последовательного заполнения полосой непрерывной группы клетей, когда клетки переходят в режим прокатки. Во время захвата полосы валками следующей клетки в полосе формируется усилие (подпор, натяжение или петлеобразование), которое как возмущение передается валкам предыдущей клетки. В зависимости от величины межклетевого усилия в линии привода этой клетки формируются большие или меньшие упругие крутильные колебания. По результатам измерения упругих моментов устанавливают степень динамического взаимодействия клетей через полосу. Сравнение результатов моделирования и измерений момента сил упругости показывает идентичность колебаний момента (рис. 6). При моделировании динамики взаимодействия черновых клетей дуо и № 1, где прокатывается толстая полоса, получены варианты с натяжением полосы между клетями и подпором, идентичные результатам измерений [9].

Таким образом, приведенные результаты показывают, что вопросам идентификации математической модели взаимодействия клетей следует уделять особое внимание. Выполненные этапы идентификации позволили обосновать и получить достаточно надежную математическую и компьютерную модель динамического взаимодействия клетей через полосу при непрерывной прокатке.

ВЫВОДЫ

Приведены практические методы идентификации математической и компьютерной модели динамического взаимодействия шести клетей непрерывной группы прокатного стана, в которой учтены упругие колебания клетки и линии главного привода, и транспортное запаздывание. Результаты моделирования сравниваются с данными натурных измерений в установившемся режиме прокатки и в период заполнения группы клетей полосой, что позволило убедиться в адекватности модели.

Перечень ссылок

1. Автоматизированные широкополосные станы, управляемые ЭВМ [Н.А. Беняковский, Н.А. Ананьевский, Ю.В. Коновалов и др.]. М.: Металлургия. – 1984. – 240 с.
2. Скичко П.Я. Определение нагрузок в главных линиях клетей непрерывного заготовочного стана Енакиевского металлургического завода / П.Я. Скичко, И.И. Леена // М.: ВНИИметмаш. – 1968. – Сб. № 23. – Т.1. – С.47–63.
3. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. М.: Металлургия. 1972. – 512 с.
4. Прокатка металла со сварными соединениями / [В.Л. Мазур, В.И. Мелешко, Д.П. Галкин и др.]. М.: Металлургия, 1985. – 112 с.
5. Путноки А.Ю. Модель динамического взаимодействия смежных черновых клетей широкополосного стана при непрерывной прокатке / А.Ю. Путноки, В.В. Веренев // Металл и литье Украины. – 2002. – № 11–12. – С.26–30.
6. Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680 / [В.В. Веренев, В.И. Большаков, А.Ю. Путноки и др.] // Днепрпетровск: ИМА–пресс, 2011. – 184 с.
7. Swiatoniowski A., Gregorczyk R. / Mathematical modeling of the strip in the continuous rolling mill group // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 8–9. – С.45–48.
8. Веренев В.В. Исследование динамики главных линий клетей непрерывных широкополосных станов горячей прокатки и влияния динамических процессов на продольную разнотолщинность полос: автореф. дисс. ...канд. техн. наук / В.В. Веренев Валентин Владимирович. – Днепрпетровск, 1975. – 20 с.
9. Путноки А.Ю. Моделирование взаимодействия черновых клетей стана 1680 через прокатываемую полосу / А.Ю. Путноки, В.В. Веренев, Н.И. Подобедов, О.М. Клевцов // Сб. «Защита металлургического оборудования от поломок». Мариуполь: ПГТУ. Вып. № 7. 2003. С.17–21.

Статья поступила 16.12.2014.

Рецензент: д.т.н. Веренев В.В.