

**В.В.Веренев, Н.И.Подобедов,  
С.В.Мацко, О.В.Симененко, В.А.Яценко**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛЕТЕЙ ЧИСТОВОЙ ГРУППЫ  
ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ЧЕРЕЗ ПОЛОСУ С УЧЁТОМ  
ПОДАТЛИВОСТИ ЛИНИЙ ПРИВОДА**

*Институт черной металлургии НАН Украины,  
ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь»*

Исследован характер переходных процессов в непрерывной группе клетей широкополосного стана, когда при моделировании учитываются упругие крутильные колебания в линиях привода валков и податливой системы клетки. Установлено, что при незначительном скачкообразном увеличении толщины полосы на входе в клеть во время прокатки натяжение перед клетью через 0,2 сек. уменьшается до нуля и далее происходит петлеобразование; при уменьшении толщины натяжение перед и за клетью увеличивается соответственно в 2 и 1,5 раза.

**непрерывная группа клетей широкополосного стана, линии привода валков, крутильные колебания, податливость системы клетки, петлеобразовании**

**Современное состояние вопроса.** Широкополосным станам горячей прокатки присущи два нестабильных технологических режима – заполнение и освобождение непрерывной группы клетей полосой. Наибольшие колебательные процессы и динамические нагрузки в оборудовании возникают во время последовательного захвата полосы валками. В этот период системы регулирования из-за ограниченного быстрогодействия не успевают оказать заметное воздействие на процесс прокатки. Каждая клеть накладывает свой отпечаток динамических колебаний на передний участок полосы. Кроме того, в результате взаимодействия смежных клетей в полосе возникают кратковременные нерегулируемые продольные усилия (натяжение или сжатие), которые в общем случае приводят к колебаниям ее размеров.

Задача взаимодействия клетей через прокатываемую полосу решалась многими исследователями в связи с конкретно возникавшими производственными вопросами и в плане теоретических разработок. В работах [1,2] и др. в качестве динамического звена выступает главный привод. Принято, что соединение двигателя с валками абсолютно жесткое, в переходных процессах скорость валков отождествляется со скоростью двигателя. Решается задача определения характера переходных процессов при ударном приложении нагрузки, т.е. в период захвата полосы валками, когда возможно такое рассогласование скоростей вращения валков клетей (двигателя), которое может вызвать недопустимые колебания межклетевого усилия и дестабилизировать процесс прокатки. Неустойчивый про-

цесс состоит в возникновении существенного подпора и образовании петли в полосе между клетями или натяжения, которое может вызвать утяжку полосы или пробуксовку валков, что трудно контролировать. Второе допущение состоит в том, что упругая система клетки является безинерционным звеном.

Интенсификация прокатного производства за счет увеличения обжатий, скорости прокатки, освоение новых энергосберегающих технологий привели к существенному увеличению динамических нагрузок при захвате полосы валками. Появилась потребность установить роль и влияние упругих колебаний в клетях и линии главного привода как на процесс непрерывной прокатки, так и на работу оборудования и действующие на него и прокатываемую полосу динамические нагрузки.

Их учет в работе [3] позволил получить ряд новых результатов моделирования взаимодействия двух клеток при пропуске сварного соединения. Главный результат состоит в том, что в период входа во вторую клетку сварного шва (как возмущающего фактора), в системе клетки появляются кратковременные высокочастотные колебания (во многом обусловленные жесткостью полосы в очаге). Эти колебания через опережение проявляются в колебаниях межклетевого натяжения, которые затем переходят в колебания с частотой линии привода. Такой подход впервые позволил выяснить роль и влияние механических колебаний упругой системы клетки на натяжение и толщину полосы. Однако в [3] приведены результаты моделирования для частного случая, когда скорость выхода полосы из  $(n-1)$ -й клетки и скорость входа в  $(n+1)$ -ю клетку постоянны, т.е. исследуется возмущение только в одной клетке.

**Постановка задачи.** Авторами разработана математическая модель динамического взаимодействия клеток непрерывной группы широкополосного стана с учётом крутильной податливости главных линий клеток и вертикальной системы клетки в соответствии с математической моделью [3]. Задача состояла в том, чтобы получить установившийся режим прокатки (постоянство всех параметров) полосы заданной толщины и затем определить реакцию системы на скачкообразное возмущение, т.е. установить особенности и характер изменения таких параметров, как скорость выхода полосы из предыдущей клетки и скорость её входа в последующую клетку, межклетевые натяжения, толщины полосы на выходе каждой клетки, опережение, которые на станах не измеряются. Случаи быстрого изменения толщины полосы возможны при срабатывании быстродействующих нажимных механизмов во время регулирования толщины полосы.

#### **Изложение основных результатов исследования.**

Рассмотрим результаты моделирования на примере взаимодействия первых трёх клеток (реакция остальных клеток значительно меньше и не приводится на иллюстрациях). На рис.1 приведен пример, когда в среднюю 6-ю клетку задали скачкообразное изменение толщины полосы во время установившегося режима прокатки с натяжением 10 Тс. В началь-

ный момент времени из-за действия возмущения (увеличения нагрузки) скорость входа полосы в клеть 6 уменьшается в то время как скорость выхода полосы из клетки 5 некоторое время остается постоянной. Рассогласование скорости входа  $V_{ВХ6}$  и выхода  $V_{ВЫХ5}$  достигает существенного значения – 0,02 м/с. Это приводит к быстрому уменьшению межклетевого натяжения  $T_{56}$  до нуля и формированию петли или подпора (на рис. 1а приведен случай петли). Скорость входа полосы в клеть 7 в начальный момент не изменяется. Отклонение выходной толщины полосы от номинальной наиболее существенное после 6-й клетки и составляет до 0,1 мм.

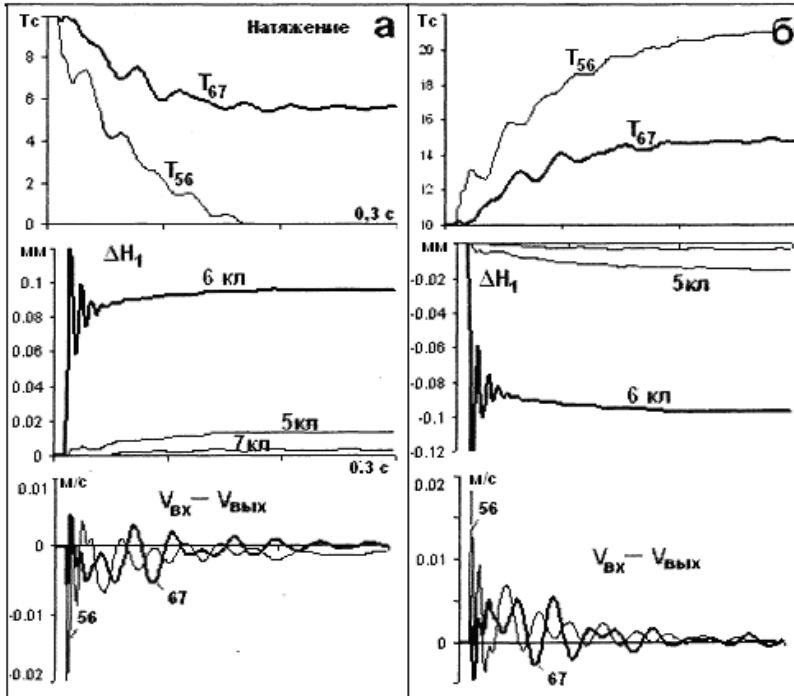


Рис.1. Параметры взаимодействия клеток 5, 6 и 7 при задании в 6-ю клеть отклонения входной толщины полосы на 0,2 мм (а) и на -0,2 мм (б).

Результаты расчетов для полосы 2,5 мм при скачке входной толщины в третью (7-ю клеть) приведены на графиках рис.2. Начальное натяжение в промежутках составляет 5 Tc. В клетки №7 из-за увеличения момента сопротивления на валках уменьшается их окружная скорость и скорость входа полосы в клеть (рис. 2б), при этом в клетки 6 изменение скорости валков и выхода полосы значительно меньше. Это привело к быстрому падению натяжения  $T_{67}$  в полосе между клетями 6 и 7 (рис.2а) и через 0,04с к петлеобразованию. Эта петля (рис.2в) имеет тенденцию накапли-

ваться, но с большей скоростью, чем в предыдущем примере, т.к. натяжения здесь в 2 раза меньше (5 Тс). Между клетями 5–6 натяжение несколько уменьшается и после колебаний с частотой момента сил упругости в течение 0,2 сек. устанавливается.

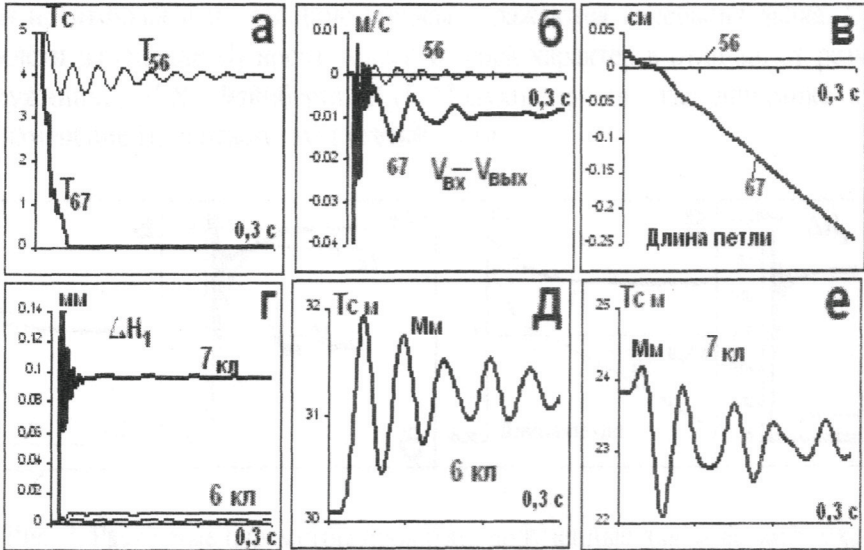


Рис. 2. Изменение параметров прокатки при задании превышения входной толщины полосы в 7-ю клеть

Так как натяжение в промежутке 6–7 падает, на линию привода средней 6-й клетки ложится дополнительная нагрузка на поддержание силового равновесия между двумя, связанными полосой, клетями 5–6:  $\Delta M_m = T_{56} R = 4 \cdot 0,3 = 1,2 \text{ Тс м}$  (рис. 2д). Из-за отсутствия натяжения  $T_{67}$  7-я клеть стала автономной и момент сил упругости на моторном валу уменьшился. Толщина полосы на выходе из клетки 7 увеличилась на 0,1 мм, а в клетях 6 и 5 соответственно на 0,016 мм и 0,004 мм (рис. 2г).

Качественно аналогичные примеру рис. 1б получены результаты при задании уменьшенной относительно номинальной толщины полосы на вход в клеть 7. Со снижением нагрузки скорость клетки 7 увеличилась и соответственно увеличились межклетевые натяжения  $T_{56}$  и  $T_{67}$ . Причем натяжение  $T_{67}$  увеличивается в большей степени (в 2–3 раза), чем  $T_{56}$  (в 1,5 раза). Это объясняется тем, что скорость последней 7-й клетки увеличивается за счёт снижения технологической нагрузки. Чем толще полоса и больше начальное значение  $T$ , тем это увеличение меньше. Переходный процесс по остальным параметрам имеет как бы зеркальное отражение по отношению к случаю задания положительного изменения входной толщины.

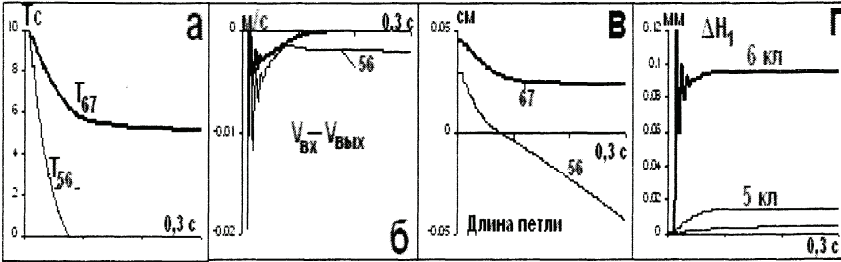


Рис.3. Расчётные параметры прокатки, полученные для «жесткой» системы

С целью сравнения выполнили аналогичные расчеты для «жесткой» системы, т.е. без учета упругих крутильных колебаний в главных линиях клеток с увеличением входной толщины в среднюю, 6-ю клетку. Составляющая переходных процессов, обусловленная упругими крутильными колебаниями, здесь отсутствует (рис.3). Натяжение  $T_{67}$ , толщина на выходе из клеток 5 и 6 плавно переходят к другому установившемуся значению. Колебания толщины полосы  $H_1$  на выходе из клетки 6, в которую задано возмущение, практически такие же, как в «мягкой» системе, поскольку в обоих случаях модели упругой системы клетки идентичны и на толщине полосы отражаются колебания вала в вертикальном направлении. С учетом податливости клетки изменение  $H_1$  носит колебательный характер в отличие от результатов работ [1,2] и др., где динамика клетки не учитывается и изменение  $H_1$  соответствует статическому.

### Выводы

Получено представление о характере изменения натяжений, скоростей входа и выхода полосы, толщины её после клетки, которые на станах не измеряются. Установлено, что при незначительном скачкообразном увеличении толщины полосы на входе в клетку во время прокатки натяжение перед клетью через 0,2 сек. уменьшается до нуля и далее происходит петлеобразование; при уменьшении толщины натяжение перед и за клетью увеличивается соответственно в 2 и 1,5 раза.

Отличие в результатах моделирования «мягкой» системы от «жесткой» состоит в том, что на натяжениях отражается частота крутильных колебаний линий привода клеток, на начальном коротком участке выходной толщины полосы отражается частота собственных колебаний клетки, петлеобразование происходит в 1,5 – 2 раза медленнее.

1. *Дружинин Н.Н.* Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: Металлургия, 1967. – 259 с.
2. *Файнберг Ю.М.* Автоматизация непрерывных станов горячей прокатки. – «Металлургия», 1963.
3. *Прокатка* металла со сварными соединениями / В.Л.Мазур, В.И.Мелешко, Д.П.Галкин и др. – М.: Металлургия, 1985. – 112 с.

*Статья рекомендована к печати:  
Ответственным редактором  
раздела «Металлургическое машиноведение»  
академиком НАН Украины В.И.Большаковым*

***В.В.Вернев, Н.І.Подобедов, С.В.Мацко, О.В.Сищенко, В.А.Яценко***  
**Моделювання взаємодії клітей чистої групи широкополосового стану  
через смугу з урахуванням податливості ліній приводу**

Досліджено характер перехідних процесів у безперервній групі клітей широкополосового стану, коли при моделюванні враховуються пружні крутильні коливання в лініях приводу валків і податливість системи кліті. Встановлено, що при незначному стрибкоподібному збільшенні товщини смуги на вході в кліть під час прокатування натягнення перед кліттю через 0,2 сек. зменшується до нуля і далі відбувається утворення петлі, при зменшенні товщини натягнення перед і за кліттю збільшується відповідно в 2 і 1,5 рази.