

В. В. Вернев, Н. И. Подобедов

**САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ В
ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНАХ**

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Целью работы является развитие представлений о процессах регулирования процесса прокатки в непрерывных группах клетей широкополосного стана горячей прокатки. Путем математического моделирования динамики взаимодействия клетей при непрерывной прокатке с учетом крутильных колебаний и транспортного переноса определили длительность времени саморегулирования шестиклетевой группы. Показано, что параметры прокатываемой полосы существенно влияют на характер изменения натяжений и отклонений толщины полосы после каждой клетки. Во время заполнения полосы непрерывной группы в клетях стана действуют возмущения, обусловленные захватом полосы валками каждой клетки. Задание регулирующих воздействий в этот момент может усилить дестабилизацию процесса. Толщина прокатываемой полосы незначительно сказывается на времени саморегулирования процесса непрерывной прокатки. В режимах прокатки и заполнения группы полосой это время составило ~14 с от начала действия возмущения на входе в группу. Определены знаки возмущений и их сочетаний по отклонению толщины и температуры полосы, при которых возможна кратковременная потеря стабильности процесса из-за падения натяжений в некоторых промежутках. Установлено, что имеются такие сочетания знаков возмущений по толщине и температуре полосы, когда происходит распад группы на две не связанные между собой, что приводит к нарушению стабильности процесса по натяжениям. Установленные выше особенности саморегулирования следует учитывать при управлении процессом непрерывной прокатки.

Ключевые слова: непрерывная прокатка, полоса, отклонение толщины, натяжение, время саморегулирования

Состояние проблемы. Процесс непрерывной прокатки обладает свойством саморегулирования секундных объемов металла, проходящих через клетки. При этом имеется ввиду, что действуют небольшие возмущения: отклонение толщины или температуры полосы от номинальных (расчетных) значений, изменение положения нажимных винтов и др. Данная особенность непрерывной прокатки, в которой большую роль играет опережение, исследовали Ю.М. Файнберг, В.И. Выдрин, А.П. Чекмарев, Н.И. Дружинин и др. [1-6] Ими описана механика саморегулирования через опережение, как правило, на примере двух клетей. Однако вопросы длительности процесса, его зависимости от параметров технологии, оборудования и возмущений не рассматривались. Поэтому изучению свойств саморегулирования при действии различных возмущений в разных местах (клетях) стана позволяет глубже постичь

процессы, и условия стабильной прокатки и работы многоклетевых станом.

Целью работы является развитие представлений о процессах регулирования процесса прокатки в непрерывных группах клетей широкополосного стана горячей прокатки.

Изложение основных результатов исследования. Решения вариантов задачи выполнены с помощью математической модели, описывающей динамику взаимодействия через прокатываемую полосу шести клетей непрерывной чистовой группы стана 1680 [7]. В модели учтены крутильные упругие колебания линий главного привода валков, упругие колебания станины клетей, межклетевые усилия, транспортный перенос (запаздывание) отклонения толщины полосы между клетями и др. Учли, что процесс саморегулирования завершился, если межклетевые натяжения $T_{i,i+1}$ и отклонение толщины Δh_i после каждой клетки приняли некоторые новые постоянные значения. Режим обжатию, при котором проводили расчеты, представлен в таблице.

Исследование выполнили для двух режимов прокатки при отсутствии регулирующих воздействий: А – установившийся процесс, когда полоса прокатывается одновременно во всех шести клетях; Б – последовательное заполнение полосой непрерывной группы.

Таблица. Режим обжатию в чистовых клетях стана 1690 при прокатке полосы 2,5 x 1200 мм

№ клетки Параметр	5	6	7	8	9	10
H , мм	23	11,7	7,6	5,0	3,7	2,8
h , мм	11,7	7,6	5,0	3,7	2,8	2,5
V , м/с	1,52	2,35	3,6	4,77	6,35	7,65

Сначала в режима А в чистовую группу задали скачкообразное изменение толщины полосы $\Delta H_0 = \pm 0,5$ мм при равных межклетевых натяжениях. На это возмущение несущественно реагирует крутящий момент в отличие от натяжений $T_{i,i+1}$ и толщины Δh_i (рис.1). Как видим, знак возмущения существенно повлиял на характер изменения натяжений и отклонений толщины полосы после каждой клетки. Согласно рис.1,а при $-\Delta H_0$ натяжения ступенчато увеличиваются вслед за переносом отклонения толщины. После первой чистовой клетки (№5) толщина полосы уменьшилась на $\Delta h_5 \approx -0,13$ мм. Это значение Δh_5 через $\sim 3,6$ с в качестве возмущения поступило в следующую клетю № 6, вызвав увеличение натяжения T_{56} и уменьшение на выходе $\Delta h_6 \approx -0,06$ мм и т.д. С целью компактного построения рис.1 и следующих межклетевые расстояния уменьшены в 2 раза (3 м) в то время как в расчетах оно равно

6 м. Поэтому пройдя все межклетевые промежутки, первоначальное значение Δh_0 , но уже трансформированное возмущение, достигает клетки №10 через $\sim 4,3 \cdot 2 = 8,6$ с. В течение этого времени внутри системы происходит саморегулирование. После выхода из последней клетки (№10) отклонения Δh_{10} процесс еще саморегулируется и при $t_{\text{сам}} \approx 7,0 \cdot 2 = 14$ с $T_{i,i+1}$ и h_i принимают постоянные значения.

Увеличение входной толщины после переноса отклонения Δh_5 к клетке №6 приводит к уменьшению натяжения T_{56} , т.е. происходит петлеобразование (рис.1,б). Стабилизация натяжений $T_{67} - T_{9,10}$ наступает также через ~ 14 с. Однако в промежутке 5-6 в течение этого времени накапливается полоса. Клеть №5 не участвует в общем саморегулировании, поскольку она не связана с остальной группой клеток. На некоторое время нарушается стабильный процесс прокатки. Данный результат важен тем, что он показывает, что задание в такие моменты регулирующих воздействий может усилить дестабилизацию процесса.

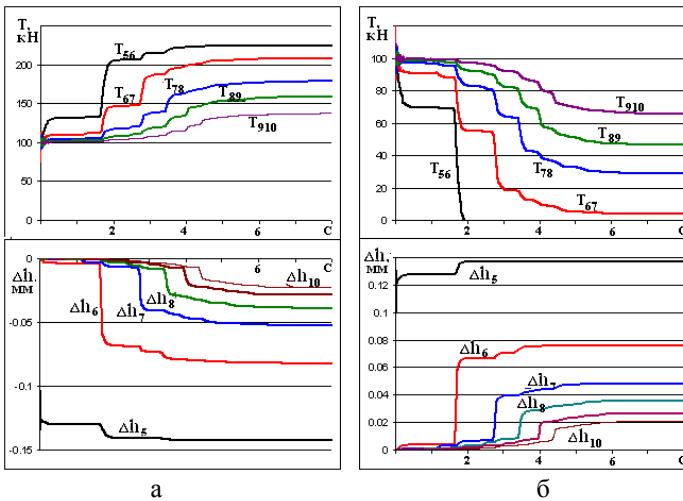


Рисунок 1 – Переходные процессы по каналам натяжений T и толщины полосы Δh при уменьшении (а) и увеличении (б) толщины полосы на входе в группу на $\Delta H = 0,5$ мм во время установившегося режима прокатки

Расчеты вариантов с регулированием нажимных винтов (н.в.) приводят к близким к предыдущим результатам (рис.2, 3). При подъеме и опускании н.в. в первой чистовой клетке (№5) получаются противоположные результаты. Однако время саморегулирования в обоих вариантах остается равным ~ 14 с. Худший случай наступает при опускании н.в. в других клетях, т.е. внутри группы (рис.3,б). Тогда

происходит падение заднего натяжения (по отношению к регулируемой клетке) до нуля. В остальных клетях, соединенных полосой с натяжением, время саморегулирования составляет 8-4 с в зависимости от номера клетки, в которой приложено возмущение (рис.3,б). В данном случае непрерывная группа кратковременно распадается на две независимые подгруппы - клетки № 5, 6, 7 и № 8, 9, 10. Если в это время произойдет подобное срабатывание н.в. в другой клетке, нестабильность процесса может усугубиться.

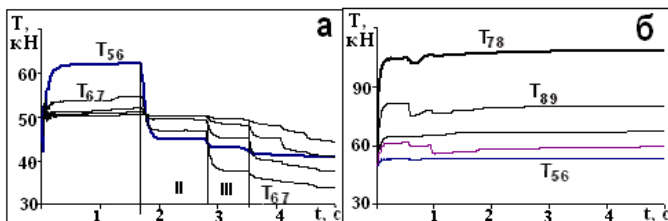


Рисунок 2 – Изменение межклетевых натяжений при подъёме нажимных винтов на 0,2 мм в клетях № 5 (а) и № 8 (б)

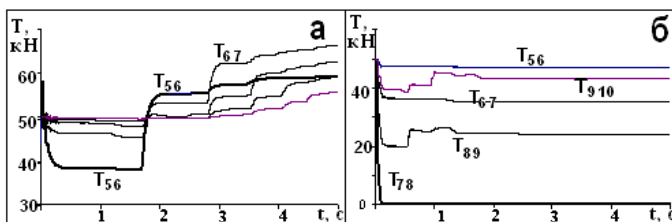


Рисунок 3 – Изменение межклетевых натяжений при опускании нажимных винтов на 0,2 мм в клетях № 5 (а) и № 8 (б)

Во время заполнения полосой непрерывной группы (режим Б) в клетях стана действуют возмущения, обусловленные захватом полосы валками каждой клетки. Поэтому отклонение толщины подката $\pm\Delta h_0$ здесь проявляется сильнее в уменьшении или увеличении натяжений $T_{i,i+1}$ и Δh_i (рис.4). Худшим вариантом по устойчивости является увеличение толщины полосы. На рис.4, б натяжение T_{56} появилось немного позже входа полосы в клетку № 6, а T_{67} появилось через 3 с после входа полосы в клетку №10. В течение почти 10 с клетки № 5 и 6 не связаны через натяжение в полосе с остальными клетями. В целом общее время саморегулирования составило также ~14 с.

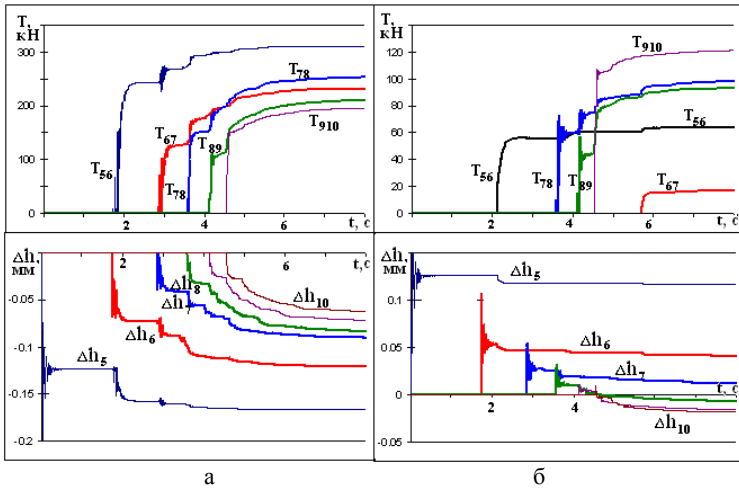


Рисунок 4 – Межклетевые натяжения и отклонения толщины полосы после клеток при уменьшении (а) и увеличении (б) толщины подката на 0,5 мм в режиме заполнения группы полосой

Установили, что в режимах А и Б наилучшим сочетанием отклонений толщины и температуры является увеличение толщины и температуры полосы. Уменьшение или увеличение в два раза межклетевых расстояний во столько раз соответственно приводит к изменению процесса самовыравнивания, несмотря на роль полосы в промежутках. Аналогичное влияние оказывает изменение в ту или иную сторону скорости прокатки. Толщина прокатываемой полосы незначительно сказывается на времени саморегулирования процесса непрерывной прокатки.

В работе [6] приведены результаты моделирования межклетевых натяжений в чистовых клетях стана 2000-Ч. В модели не учитывались крутильные колебания в линиях привода и транспортный перенос (запаздывание). Фактически была использована «жесткая» модель. Отмечается, что при опускании нажимных винтов в первой чистовой клетке период саморегулирования в режиме прокатки составляет 0,02-0,07 с при плавном и быстром изменении межклетевых натяжений. Как видим, такая модель дает результат на два порядка меньше, чем в нашем случае, и вызывает недоверие к полученным результатам решения.

Выводы. Установлено, что время саморегулирования процесса непрерывной прокатки в шестиклетевой группе в установившемся режиме и режиме заполнения полосой составляет около 14 с с момента действия возмущения на входе. Это время мало зависит от величины возмущения, жесткости линия привода и клеток, режима обжати и уровня натяжений.

При регулировании нажимными винтами в первой клетке в режиме прокатки время $t_{\text{сам}}$ уменьшается и составляет ≈ 8 с. При опускании нажимных винтов в одной из клеток в середине группы происходит потеря заднего натяжения в этой клетке.

Установлено, что имеются также такие сочетания знаков возмущений по толщине и температуре полосы, когда происходит распад группы на две не связанные между собой, что приводит к нарушению стабильности процесса по натяжениям. Полученные значения времени саморегулирования, по-видимому, является свойством непрерывных групп широкополосных станов.

Установленные выше особенности саморегулирования следует учитывать при управлении процессом непрерывной прокатки.

Библиографический список

1. *Выдрин В.И.* Динамика прокатных станов / В.И. Выдрин // Свердловск: Metallurgizdat, 1960. - 225 с.
2. *Чекмарев А.П.* Исследование переходных процессов в трех клетках непрерывного стана /А.П. Чекмарев, М.П. Топоровский // Прокатное производство. Сб. н. тр. ИЧМ. – М: Metallургия. – 1965. – Т.ХХI. – С.81–121.
3. *Чекмарев А.П.* Взаимосвязь клеток и промежутков между ними при прокатке на непрерывном мелкосортном стане /А.П. Чекмарев, М.П. Топоровский // Прокатное производство. Сб. н. тр. ИЧМ. – М: Metallургия. – 1967. – Т.ХХI. – С.5–64.
4. *Дружинин Н.Н.* Непрерывные станы как объект автоматизации / Н.Н. Дружинин // М.: Metallургия. – 1975. - 336 с.
5. *Файнберг Ю.М.* Автоматизация непрерывных станов горячей прокатки / Ю.М. Файнберг // «Metallургия». 1963.
6. *Автоматизированные широкополосные станы, управляемые ЭВМ* / М.А. Беньковский, М.Г. Ананьевский, Ю.В. Коновалов [и др.] // М.: Metallургия. – 1984. – 240 с.
7. *Веренев В.В.* Переходные процессы при непрерывной прокатке / В.В. Веренев, А.Ю. Путники, Н.И. Подобедов // Монография. – Д.: Літограф, 2017. – 116 с.

Reference

1. *Vydrin V.I.* Dinamika prokatnykh stanov / V.I. Vydrin // Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1960. - 225 s.
2. *Chekmarev A.P.* Issledovaniye perekhodnykh protsessov v trekh kletyakh nepreryvnogo stana /A.P. Chekmarev, M.P. Toporovskiy // Prokatnoye proizvodstvo. Sb. n. tr. ICHM. – M: Metallurgiya. – 1965. – Т.ХХI. – S.81–121.
3. *Chekmarev A.P.* Vzaimosvyaz' kletey i promezhutkov mezhdru nimi pri prokatke na nepreryvnom melkosortnom stane /A.P. Chekmarev, M.P. Toporovskiy // Prokatnoye proizvodstvo. Sb. n. tr. ICHM. – M: Metallurgiya. – 1967. – Т.ХХI. – S.5–64.

4. *Druzhinin N.N.* Nepreryvnyye stany kak ob'ekt avtomatizatsii / N.N. Druzhinin // M.: Metallurgiya. – 1975. - 336 s.
5. *Faynberg YU.M.* Avtomatizatsiya nepreryvnykh stanov goryachey prokatki / YU.M. Faynberg // «Metallurgiya». 1963.
6. *Avtomatizirovannyye shirokopolosnyye stany, upravlyayemye EVM* / M.A. Benyakovskiy, M.G. Anan'yevskiy, YU.V. Konovalov [i dr.] // M.: Metallurgiya. – 1984. – 240 s.
7. *Verenev V.V.* Perekhodnyye protsessy pri nepreryvnoy prokatke / V.V. Verenev, A.YU. Putnoki, N.I. Podobedov // Monografiya. – D.: Litograf, 2017. – 116 s.

V. V. Verenev, N. I. Podobedov

Саморегулювання при безперервній прокатці в широкосмугових станах

Метою роботи є розвиток уявлень про регулювання процесу прокатки в безперервних групах клітей широкосмугового стану гарячого прокатування. Шляхом математичного моделювання динаміки взаємодії клітей при безперервному прокатуванні з урахуванням крутильних коливань і транспортного перенесення визначили тривалість часу саморегулювання шестіклетевої групи стану. Показано, що параметри прокатуваної смуги істотно впливають на характер зміни натягів і відхилень товщини смуги після кожної кліті. Під час заповнення смугою безперервної групи в клітях стану діють фактори, обумовлені захопленням смуги валками кожної кліті. Завдання регулюючих впливів у цей момент може посилити дестабілізацію процесу. Товщина смуги майже не позначається на часі саморегулювання процесу безперервного прокатування. У режимах прокатування і заповнення групи смугою цей час склало ~ 14 с від початку дії збурення на вході в групу. Визначено знаки збурень і їх поєднань по відхиленню товщини і температури смуги, при яких можлива короткочасна втрата стабільності процесу через падіння натягу в деяких проміжках. Встановлено, що є такі поєднання знаків збурень по товщині і температурі смуги, коли відбувається розпад групи на дві не зв'язані між собою, що призводить до порушення стабільності процесу по натягу. Встановлені вище особливості саморегулювання слід враховувати при управлінні процесом безперервної прокатки.

Ключові слова: безперервна прокатка, смуга, відхилення товщини, натяг, час саморегулювання

V. V. Verenev, N. I. Podobedov

Self-regulation during continuous rolling in broadband mills

The aim of the work is the development of ideas about the regulation of the rolling process in continuous groups of stands of a wide-strip hot rolling mill. By mathematical modeling of the dynamics of the interaction of the stands during continuous rolling, taking into account torsional vibrations and transport transfer, the duration of the self-regulation time of the six-yielding group was determined. It is shown that the parameters of the rolled strip significantly affect the nature of the change in tensions and deviations of the strip thickness after each stand. During the filling of a continuous band with a strip in the mill stands, there are perturbations caused by the capture of the strip by the

rolls of each stand. The task of regulatory actions at this point can increase the destabilization of the process. The thickness of the rolled strip slightly affects the self-regulation time of the continuous rolling process. In the modes of rolling and filling the group with a strip, this time was ~ 14 s from the beginning of the disturbance at the entrance to the group. The signs of perturbations and their combinations are determined by the deviation of the strip thickness and temperature, at which a short-term loss of process stability is possible due to a drop in tension in some intervals. It has been established that there are such combinations of perturbation signs in thickness and strip temperature when a group disintegrates into two unrelated ones, which leads to a violation of the stability of the tension process. The above features of self-regulation should be considered when managing the process of continuous rolling.

Keywords: continuous rolling, strip, thickness deviation, tension, self-regulation time

*Статья поступила в редакцию сборника 01.11.2018 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)
Рецензенты: д.т.н, проф. И.В.Добров, д.т.н. С.А.Воробей,
к.т.н. К.В.Баюл*