



The mathematical model of the process of continuous rolling in reducing-calibrating block, with the help of which the theoretical analysis of this process is carried out, is developed.

С. М. ЖУЧКОВ, А. А. ГОРБАНЕВ, ИЧМ им. З.И. Некрасова НАН Украины,
В. А. МАТОЧКИН, РУП «БМЗ»

УДК 621.771.25:001.891.573.083.133

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РЕДУКЦИОННО-КАЛИБРУЮЩЕМ БЛОКЕ СОВРЕМЕННОГО ПРОВОЛОЧНОГО СТАНА

В связи с насыщенностью рынка катанкой ужесточаются требования к ее качеству – массе мотков, механическим свойствам, структуре и точности размеров. Потребителям требуется катанка расширенного размерного и марочного сортамента. Возрастает спрос на катанку диаметром менее 5,5 мм с отклонениями размеров менее $\pm 0,1$ мм из высоколегированных сталей. Фирмами-изготовителями проволочных станов разрабатываются и опробуются новые схемы расположения оборудования, позволяющие управлять температурой конца прокатки в широких пределах – от 750–800 до 1050 °С. Это дает возможность в зависимости от марки стали и назначения катанки осуществлять термомеханическую обработку в потоке стана и нормализующую прокатку катанки при скоростях прокатки до 140 м/с. За счет этого улучшаются структура и механические свойства катанки, что снижает затраты при ее дальнейшей переработке в метизном и сталепроволочном производствах.

В настоящее время строятся проволочные станы, в состав основного технологического оборудования которых входят четырехклетевые редуционно-калибрующие блоки, установленные на определенном расстоянии за основными восьми-десятиклетевыми блоками. Это позволяет осуществлять между блоками принудительное водяное охлаждение раската и управлять температурой конца прокатки в заданных пределах. Редуционно-калибрующие блоки были установлены фирмой СМС Меер на новых станах в Бразилии и Китае и фирмой Морган при модернизации хвостовой части проволочного стана 150 Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод» [1, 2].

Редуционно-калибрующий блок стана 150 РУП «БМЗ» состоит из четырех клетей. Первые две клетки – редуцирующие. Они служат для уменьшения сечения раската. В зависимости от диаметра катанки прокатка в этих клетях осуществляется с коэффициентами вытяжки в каждой клетке, равными 1,120–1,321. Две последние клетки блока – калибрующие. Они предназначены для повышения точности катанки, поэтому прокатка в них осуществляется с существенно меньшими коэффициентами вытяжки, находящимися в пределах 1,010–1,129. Привод клетей редуционно-калибрующего блока общий от

электродвигателя мощностью 2800 кВт и частотой вращения 850–1700 $\frac{1}{\text{мин}}$. Минимальная расчетная температура раската на входе в блок – 750 °С, диаметр катанки – 4,5–22,0 мм. Диаметр валков редуцирующих клетей блока – 205–228 мм, калибровка – ”круг–круг”. Рабочие валки всех клетей дисковые, твердосплавные.

Применение редуционно-калибрующих блоков, разработанных в последние годы, на высокоскоростных проволочных станах является перспективным решением, однако до настоящего времени основные теоретические положения процесса прокатки в этих блоках разработаны недостаточно. Это затрудняет выбор рациональных управляющих воздействий на процесс непрерывной высокоскоростной прокатки с учетом ее особенностей. Развитие научных и технологических основ процесса высокоскоростной прокатки в редуционно-калибрующем блоке позволит сформировать научно обоснованные подходы к повышению устойчивости прокатки катанки со скоростью до 140 м/с и уменьшению отклонений ее размеров на всех диаметрах менее $\pm 0,1$ мм. Возможности комплексного

экспериментального исследования процесса прокатки в редуционно-калибрующих блоках, установленных на стане 150 РУП «БМЗ» и на некоторых зарубежных станах, ограничены по причинам, связанным с конструктивным исполнением приводных линий блоков, неизбежной потерей объема производства, ухудшением качества катанки при варьировании температурно-деформационных режимов прокатки в клетях блоков и вследствие высоких скоростей прокатки, а также наличием многочисленных обратных связей параметров процесса. Поэтому необходима разработка средств аналитического исследования параметров этого процесса – математической модели непрерывной высокоскоростной прокатки катанки в редуционно-калибрующих блоках. Использование этой модели при анализе процесса позволит учесть как качественное, так и количественное взаимное влияние температурно-деформационных параметров прокатки в клетях блоков, осуществляемое через прокатываемую полосу, что в конечном итоге определяет качество готовой катанки. При разработке математической модели были учтены особенности процесса высокоскоростной прокатки, наличие продольных усилий в раскате между клетями и общий привод клетей редуционно-калибрующего блока.

В работах Н.Н. Дружинина, А.П. Чекмарева, В.Н. Выдрина и А.С. Федосиенко и других авторов разработаны основы современной теории непрерывной сортовой прокатки [3–9]. Основные положения этой теории были положены в основу математической модели процесса горячей прокатки в редуционно-калибрующих блоках современных проволочных станов.

Кроме того, при разработке математической модели процесса горячей прокатки в редуционно-калибрующем блоке были приняты следующие положения [10].

1. Редуционно-калибрующий блок рассмотрен как единый агрегат, в котором взаимодействие клетей осуществляется через прокатываемую полосу.

2. Так как клетки блока имеют общий привод, частоту вращения валков приняли постоянной, определяемой общими передаточными числами приводной линии каждой клетки от электродвигателя к валкам.

3. Раскат между клетями рассмотрен как абсолютно жесткое тело.

4. Реакция клетки блока на возмущения складывается из приращения размеров раската и опережения на выходе из клетки.

Изменение натяжения в любом межклетьевом промежутке практически мгновенно передается в последующие и предыдущие промежутки.

Так как в блоках скорость вращения валков в каждой клетке постоянна, то относительное приращение скорости раската на выходе из i -й клетки определяется из уравнения

$$U_i = \frac{\pi D_i n_i}{60} (1 + S_i), \text{ как } \frac{dU_i}{U_i} = \frac{dS_i}{1 + S_i} + \frac{dD_i}{D_i},$$

где S_i , n_i , D_i – опережение, частота вращения и диаметр валков i -й клетки.

Аналогично работе [5] все возмущения, приводящие к изменению константы в данной клетке, разбиты на три группы: изменение геометрических размеров раската на входе в клетку; возмущения в самой клетке (изменение межвалковых зазоров, условий внешнего трения и др.); воздействие смежных промежутков посредством натяжения:

$$\left. \begin{aligned} h_i &= \Phi_{1i}(H_i, B_i, G_i, \sigma_{oi}, \sigma_{li}), \\ b_i &= \Phi_{2i}(H_i, B_i, G_i, \sigma_{oi}, \sigma_{li}), \\ S_i &= \Phi_{3i}(H_i, B_i, G_i, \sigma_{oi}, \sigma_{li}), \\ V_i &= \Phi_{4i}(H_i, B_i, G_i, \sigma_{oi}, \sigma_{li}). \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

Линеаризируя функции системы (I), получаем уравнения для приращения константы на выходе из i -й клетки:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU_i}{U_i} &= \frac{dD_i}{D_i} + \frac{1}{1 + S_i} \left(\frac{\partial S_i}{\partial H_i} dH_i + \frac{\partial S_i}{\partial B_i} dB_i + \frac{\partial S_i}{\partial G_i} dG_i + \frac{\partial S_i}{\partial \sigma_{oi}} d\sigma_{oi} + \frac{\partial S_i}{\partial \sigma_{li}} d\sigma_{li} \right), \\ \frac{dh_i}{h_i} &= \frac{1}{h_i} \left(\frac{\partial h_i}{\partial H_i} dH_i + \frac{\partial h_i}{\partial B_i} dB_i + \frac{\partial h_i}{\partial G_i} dG_i + \frac{\partial h_i}{\partial \sigma_{oi}} d\sigma_{oi} + \frac{\partial h_i}{\partial \sigma_{li}} d\sigma_{li} \right), \\ \frac{db_i}{b_i} &= \frac{1}{b_i} \left(\frac{\partial b_i}{\partial H_i} dH_i + \frac{\partial b_i}{\partial B_i} dB_i + \frac{\partial b_i}{\partial G_i} dG_i + \frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{oi}} d\sigma_{oi} + \frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{li}} d\sigma_{li} \right). \end{aligned} \right\} \quad (II)$$

Здесь G_i – возмущение в i -й клетке (например, изменение межвалкового зазора); S_i – опережение в данной клетке; σ_0 и σ_1 – удельные заднее и переднее натяжения; H_i и B_i – высота и ширина раската на входе в i -ю клетку; h_i и b_i – высота и ширина раската на выходе из i -й клетки.

Уравнения вида системы (III) составляются для каждой клетки редуционно-калибрующего блока. Так как прокатка происходит с переменной направления обжатия в каждой клетке, то $h_i = B_{i+1}$ и $b_i = H_{i+1}$. Как и в работе [10], для упрощения решения рассмотрим последовательно каждые две клетки редуционно-калибрующего блока и три межклетевых промежутка – между данными клетками, до и после них. Выделим по ходу прокатки клетки i и $i+1$, между которыми имеется натяжение $\sigma_{i-(i+1)}$. Это справедливо, так как в связи с малым поперечным сечением раската подпор между ними для катанки малых диаметров недопустим вследствие возможности изгиба раската и аварийной остановки стана. До этих двух клеток действует натяжение $\sigma_{(i-1)-i}$, а после них – натяжение $\sigma_{(i+1)-(i+2)}$. Через эти натяжения проявляются воздействия на размеры раската в выделенных клетках и натяжение между ними от различных возмущающих факторов до и после этих двух клеток.

При определенной настройке межвалковых зазоров и жесткой кинематической связи клеток редуционно-калибрующего блока, заданной соотношением передаточных чисел приводных линий клеток, отклонения параметров происходят относительно в небольших пределах. Поэтому, используя основное свойство дифференциала и перейдя непосредственно к приращениям функций, можно записать

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta U_{i+1}}{U_i} &= \frac{\Delta D_{i+1}}{D_{i+1}} + \frac{1}{1+S_{i+1}} \left(\frac{\partial S_{i+1}}{\partial H_{i+1}} \Delta H_{i+1} + \frac{\partial S_{i+1}}{\partial B_{i+1}} \Delta B_{i+1} + \frac{\partial S_{i+1}}{\partial G_{i+1}} \Delta G_{i+1} + \frac{\partial S_{i+1}}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \Delta \sigma_{i-(i+1)} + \frac{\partial S_{i+1}}{\partial \sigma_{(i+1)-(i+2)}} \Delta \sigma_{(i+1)-(i+2)} \right), \\ \frac{\Delta h_{i+1}}{h_{i+1}} &= \frac{1}{h_{i+1}} \left(\frac{\partial h_{i+1}}{\partial H_{i+1}} \Delta H_{i+1} + \frac{\partial h_{i+1}}{\partial B_{i+1}} \Delta B_{i+1} + \frac{\partial h_{i+1}}{\partial G_{i+1}} \Delta G_{i+1} + \frac{\partial h_{i+1}}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \Delta \sigma_{i-(i+1)} + \frac{\partial h_{i+1}}{\partial \sigma_{(i+1)-(i+2)}} \Delta \sigma_{(i+1)-(i+2)} \right), \\ \frac{\Delta b_{i+1}}{b_{i+1}} &= \frac{1}{b_{i+1}} \left(\frac{\partial b_{i+1}}{\partial H_{i+1}} \Delta H_{i+1} + \frac{\partial b_{i+1}}{\partial B_{i+1}} \Delta B_{i+1} + \frac{\partial b_{i+1}}{\partial G_{i+1}} \Delta G_{i+1} + \frac{\partial b_{i+1}}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \Delta \sigma_{i-(i+1)} + \frac{\partial b_{i+1}}{\partial \sigma_{(i+1)-(i+2)}} \Delta \sigma_{(i+1)-(i+2)} \right), \\ \frac{\Delta U_i}{U_i} &= \frac{\Delta D_i}{D_i} + \frac{1}{1+S_i} \left(\frac{\partial S_i}{\partial H_i} \Delta H_i + \frac{\partial S_i}{\partial B_i} \Delta B_i + \frac{\partial S_i}{\partial G_i} \Delta G_i + \frac{\partial S_i}{\partial \sigma_{(i-1)-i}} \Delta \sigma_{(i-1)-i} + \frac{\partial S_i}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \Delta \sigma_{i-(i+1)} \right), \\ \frac{\Delta h_i}{h_i} &= \frac{1}{h_i} \left(\frac{\partial h_i}{\partial H_i} \Delta H_i + \frac{\partial h_i}{\partial B_i} \Delta B_i + \frac{\partial h_i}{\partial G_i} \Delta G_i + \frac{\partial h_i}{\partial \sigma_{(i-1)-i}} \Delta \sigma_{(i-1)-i} + \frac{\partial h_i}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \Delta \sigma_{i-(i+1)} \right), \\ \frac{\Delta b_i}{b_i} &= \frac{1}{b_i} \left(\frac{\partial b_i}{\partial H_i} \Delta H_i + \frac{\partial b_i}{\partial B_i} \Delta B_i + \frac{\partial b_i}{\partial G_i} \Delta G_i + \frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{(i-1)-i}} \Delta \sigma_{(i-1)-i} + \frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \Delta \sigma_{i-(i+1)} \right). \end{aligned} \right\} \text{(III)}$$

Решая систему (III) относительно приращения межклетевых натяжения в промежутке клеток i и $i+1$ для базового режима прокатки, например, предусмотренного калибровкой валков, получаем:

$$\Delta \sigma_{i-(i+1)} = \frac{\Delta D_{i+1}/D_{i+1} - \Delta D_i/D_i}{K_{\sigma_{i-(i+1)}}} - (K_{H_i} \Delta H_i + K_{B_i} \Delta B_i + K_{G_i} \Delta G_i + K_{G_{(i+1)}} \Delta G_{(i+1)} + K_{\sigma_{(i-1)-i}} \Delta \sigma_{(i-1)-i} + K_{\sigma_{(i+1)-(i+2)}} \Delta \sigma_{(i+1)-(i+2)}). \quad (1)$$

Здесь $K_{\sigma_{i-(i+1)}}$ – коэффициент, отражающий обратные связи технологического процесса прокатки в клетках i и $i+1$ редуционно-калибрующего блока по натяжению; K_{H_i} , K_{B_i} , K_{G_i} , $K_{\sigma_{(i-1)-i}}$, $K_{\sigma_{(i+1)-(i+2)}}$ – передаточные коэффициенты для межклетевых натяжения при изменении размеров раската на входе в данную пару клеток, различных возмущениях в данных клетках и изменении натяжения до и после этих клеток. Данные коэффициенты показывают приращение натяжения между клетками i и $i+1$ при изменении какого-либо параметра, идущее по всем каналам [9].

Решая совместно уравнения для каждой пары клеток, можно определить приращения натяжения в любом промежутке блока и изменение ширины раската на выходе из каждой клетки.

Прокатка в редуционно-калибрующем блоке осуществляется в одну нитку в валках малого диаметра, раскат имеет небольшую ширину, а дисковые валки крепятся на коротком валу. Поэтому без особой погрешности можно принять, что межвалковые зазоры в клетках блока не зависят от

изменения в небольших пределах величин натяжения, обжатия и ширины полосы. Тогда технологические коэффициенты, показывающие связь высоты полосы в данной клетке с различными параметрами, будут равны нулю

$$\left(\frac{\partial h_i}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} = 0, \quad \frac{\partial h_{i+1}}{\partial H_{i+1}} = 0, \quad \frac{\partial h_{i+1}}{\partial B_{i+1}} = 0, \quad \frac{\partial h_{i+1}}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} = 0 \right).$$

Можно также принять, что опережение не зависит от ширины раската, изменяющейся для данного диаметра катанки в пределах,

$$\left(\frac{\partial S_i}{\partial B_i} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial S_{i+1}}{\partial B_{i+1}} = 0 \right),$$

а допуская условиями эксплуатации редуционно-калибрующего блока изменение уширения за счет незначительного приращения ширины на входе в клетку можно

$$\text{пренебречь} \left(\frac{\partial b_i}{\partial B_i} = 1,0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial b_{i+1}}{\partial B_{i+1}} = 1,0 \right),$$

т.е. приращение выходной ширины по абсолютной величине и знаку будет равно приращению на входе в клетку.

Передаточные коэффициенты по натяжению определяются следующим образом:

$$K_{y_{i-(i+1)}} = \frac{1}{S_i} \frac{\partial S_i}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} + \frac{1}{b_i} \frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} - \frac{1}{S_{i+1}} \left(\frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \frac{\partial S_{i+1}}{\partial H_{i+1}} + \frac{\partial S_{i+1}}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \right) - \frac{1}{b_{i+1}} \left(\frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \frac{\partial b_{i+1}}{\partial H_{i+1}} + \frac{\partial b_{i+1}}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \right), \quad (2)$$

$$K_{y_{(i-1)-i}} = \left(\frac{1}{1+S_i} \frac{\partial S_i}{\partial \sigma_{(i-1)-i}} + \frac{1}{b_i} \frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{(i-1)-i}} - \frac{1}{1+S_{i+1}} \frac{\partial S_{i+1}}{\partial H_{i+1}} - \frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{(i-1)-i}} - \frac{1}{b_{i+1}} \frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{(i-1)-i}} \frac{\partial b_{i+1}}{\partial H_{i+1}} \right) \frac{1}{K \sigma_{i-(i+1)}}, \quad (3)$$

$$K_{y_{(i+1)-(i+2)}} = - \left(\frac{1}{1+S_{i+1}} \frac{\partial S_{i+1}}{\partial \sigma_{(i+1)-(i+2)}} + \frac{1}{b_{i+1}} \frac{\partial b_{i+1}}{\partial \sigma_{(i+1)-(i+2)}} \right) \frac{1}{K \sigma_{i-(i+1)}}. \quad (4)$$

Аналогично определяются передаточные коэффициенты для межклетьевого натяжения при изменении размеров раската на входе в данную пару клеток и различных возмущений в данных клетках (K_{H_i} , K_{B_i} , K_{G_i} и $K_{G_{i+1}}$):

$$K_{H_i} = \left(\frac{1}{1+S_i} \frac{\partial S_i}{\partial H_i} + \frac{1}{b_i} \frac{\partial b_i}{\partial H_i} - \frac{1}{1+S_{i+1}} \frac{\partial b_i}{\partial H_i} \frac{\partial S_{i+1}}{\partial H_{i+1}} - \frac{1}{b_{i+1}} \frac{\partial b_i}{\partial H_i} \frac{\partial b_{i+1}}{\partial H_{i+1}} \right) \frac{1}{K \sigma_{i-(i+1)}}, \quad (5)$$

$$K_{B_i} = \left(\frac{1}{b_i} - \frac{1}{1+S_{i+1}} \frac{\partial S_{i+1}}{\partial H_{i+1}} - \frac{1}{b_{i+1}} \frac{\partial b_{i+1}}{\partial H_{i+1}} \right) \frac{1}{K \sigma_{i-(i+1)}}, \quad (6)$$

$$K_{G_i} = \left[\left(\frac{1}{1+S_i} \frac{\partial S_i}{\partial G_i} + \frac{1}{b_i} \frac{\partial b_i}{\partial G_i} + \frac{1}{h_i} - \frac{1}{1+S_{i+1}} \frac{\partial b_i}{\partial G_i} \frac{\partial S_{i+1}}{\partial H_{i+1}} - \frac{1}{b_{i+1}} \left(\frac{\partial b_i}{\partial G_i} \frac{\partial b_{i+1}}{\partial H_{i+1}} + 1 \right) \right) \right] \frac{1}{K \sigma_{i-(i+1)}}, \quad (7)$$

$$K_{G_{i+1}} = - \left(\frac{1}{1+S_{i+1}} \frac{\partial S_{i+1}}{\partial G_{i+1}} + \frac{1}{h_{i+1}} + \frac{1}{b_{i+1}} \frac{\partial b_{i+1}}{\partial G_{i+1}} \right) \frac{1}{K \sigma_{i-(i+1)}}. \quad (8)$$

Определив изменение натяжения в промежутках $(i-1)-i$, $i-(i+1)$ и $(i+1)-(i+2)$, по уравнениям системы (II) можно найти изменение ширины на выходе из $(i+1)$ -й и i -й клеток:

$$\Delta b_i = \frac{\partial b_i}{\partial H_i} \Delta H_i + B_i + \frac{\partial b_i}{\partial G_i} \Delta G_i + \frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{(i-1)-i}} \Delta \sigma_{(i-1)-i} + \frac{\partial b_i}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \Delta \sigma_{i-(i+1)}, \quad (9)$$

$$\Delta b_{i+1} = \frac{\partial b_{i+1}}{\partial H_{i+1}} \Delta H_{i+1} + \Delta B_{i+1} + \frac{\partial b_{i+1}}{\partial G_{i+1}} \Delta G_{i+1} + \frac{\partial b_{i+1}}{\partial \sigma_{i-(i+1)}} \Delta \sigma_{i-(i+1)} + \frac{\partial b_{i+1}}{\partial \sigma_{(i+1)+(i+2)}} \Delta \sigma_{(i+1)+(i+2)}. \quad (10)$$

Изменение натяжения от базового режима во всех межклетьевых промежутках редуционно-калибрующего блока, имеющего четыре клетки, определяется системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_{1-2} &= \frac{\Delta D_2 / D_2 - \Delta D_1 / D_1}{K\sigma_{1-2}} - (K_{H1}\Delta H_1 + K_{B1}\Delta B_1 + K_{G1}\Delta G_1 + K_{G2}\Delta G_2 + K\sigma_{2-3}\Delta\sigma_{2-3}), \\ \Delta\sigma_{2-3} &= \frac{\Delta D_3 / D_3 - \Delta D_2 / D_2}{K\sigma_{2-3}} - (K_{H2}\Delta H_2 + K_{B2}\Delta B_2 + K_{G2}\Delta G_2 + K_{G3}\Delta G_3 + K\sigma_{1-2}\Delta\sigma_{1-2} + K\sigma_{3-4}\Delta\sigma_{3-4}), \\ \Delta\sigma_{3-4} &= \frac{\Delta D_4 / D_4 - \Delta D_3 / D_3}{K\sigma_{3-4}} - (K_{H3}\Delta H_3 + K_{B3}\Delta B_3 + K_{G3}\Delta G_3 + K_{G4}\Delta G_4 + K\sigma_{2-3}\Delta\sigma_{2-3} + K\sigma_{4-5}\Delta\sigma_{4-5}). \end{aligned} \right\} \quad (IV)$$

Учитывая, что перед редуционно-калибрующим блоком и после него натяжение отсутствует, изменение ширины раската относительно базового режима после каждой клетки редуционно-калибрующего блока определяется системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_1 &= \frac{db_1}{dH_1} \Delta H_1 + \Delta B_1 + \frac{db_1}{dG_1} \Delta G_1 + \frac{db_1}{d\sigma_{1-2}} \Delta\sigma_{1-2}, \\ \Delta b_2 &= \frac{db_2}{dH_2} \Delta H_2 + \Delta B_2 + \frac{db_2}{dG_2} \Delta G_2 + \frac{db_2}{d\sigma_{1-2}} \Delta\sigma_{1-2} + \frac{db_1}{d\sigma_{2-3}} \Delta\sigma_{2-3}, \\ \Delta b_3 &= \frac{db_3}{dH_3} \Delta H_3 + \Delta B_3 + \frac{db_3}{dG_3} \Delta G_3 + \frac{db_3}{d\sigma_{2-3}} \Delta\sigma_{2-3} + \frac{db_3}{d\sigma_{3-4}} \Delta\sigma_{3-4}, \\ \Delta b_4 &= \frac{db_4}{dH_4} \Delta H_4 + \Delta B_4 + \frac{db_4}{dG_4} \Delta G_4 + \frac{db_4}{d\sigma_{3-4}} \Delta\sigma_{3-4} + \frac{db_4}{d\sigma_{4-5}} \Delta\sigma_{4-5}. \end{aligned} \right\} \quad (V)$$

Одним из основных воздействий на процесс прокатки в редуционно-калибрующем блоке является изменение зазоров между валками в клетях 1–4. Поэтому в уравнениях систем (IV) и (V) принято, что изменение параметра G_i означает изменение межвалкового зазора соответствующей клетки.

В системах уравнений (IV) и (V) приращением высоты на входе l -ю клеть является приращение ширины на выходе из предыдущей клетки, а приращение ширины определяется изменением межвалкового зазора предыдущей клетки и уширением. Тогда входящие в уравнения систем (IV) и (V) изменения высоты и ширины на входе в любую клеть редуционно-калибрующего блока можно выразить через изменения размеров подката, выходящего из основного блока и входящего в первую клеть редуционно-калибрующего блока ΔH_1 и ΔB_1 , диаметров валков и межвалковых зазоров в любой клетки блока.

Для первой клетки редуционно-калибрующего блока изменение размеров раската на входе будет равно

$$\Delta H_1 = \Delta b_0 \quad \text{и} \quad \Delta B_1 = \Delta h_0,$$

где Δb_0 и Δh_0 – изменение ширины и высоты раската на выходе из основного блока, расположенного перед редуционно-калибрующим блоком.

Клетки редуционно-калибрующего блока обладают высокой жесткостью, поэтому изменением высоты раската на выходе можно пренебречь. Тогда изменения размеров раската на входе в клетки 2–4 будут равны

$$\Delta H_2 = \Delta b_1 = \frac{db_1}{dH_1} \Delta H_1 + \Delta B_1 + \frac{db_1}{dG_1} \Delta G_1 + \frac{db_1}{d\sigma_{1-2}} \Delta\sigma_{1-2}, \quad \Delta B_2 = \Delta G_1, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_3 = \Delta b_2 &= \frac{db_2}{dH_2} \frac{db_1}{dH_1} \Delta H_1 + \frac{db_2}{dH_2} \Delta B_1 + \left(\frac{db_2}{dH_2} \frac{db_1}{dG_1} + 1 \right) \Delta G_1 + \left(\frac{db_2}{dH_2} \frac{db_1}{d\sigma_{1-2}} + \frac{db_2}{d\sigma_{1-2}} \right) \Delta\sigma_{1-2} + \frac{db_2}{dG_2} \Delta G_2 + \\ &+ \frac{db_2}{d\sigma_{2-3}} \Delta\sigma_{2-3}, \quad \Delta B_3 = \Delta G_2, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_4 = \Delta b_3 &= \frac{db_3}{dH_3} \frac{db_2}{dH_2} \frac{db_1}{dH_1} \Delta H_1 + \frac{db_3}{dH_3} \frac{db_2}{dH_2} \Delta B_1 + \frac{db_3}{dH_3} \left(\frac{db_2}{dH_2} \frac{db_1}{dG_1} + 1 \right) \Delta G_1 + \frac{db_3}{dH_3} \left(\frac{db_2}{dH_2} \frac{db_1}{d\sigma_{1-2}} + \frac{db_2}{d\sigma_{1-2}} \right) \Delta\sigma_{1-2} + \\ &+ \left(\frac{db_3}{dH_3} \frac{db_2}{dG_2} + 1 \right) \Delta G_2 + \frac{db_3}{dG_3} \Delta G_3 + \left(\frac{db_3}{dH_3} \frac{db_2}{d\sigma_{2-3}} + \frac{db_3}{d\sigma_{2-3}} \right) \Delta\sigma_{2-3} + \frac{db_3}{d\sigma_{3-4}} \Delta\sigma_{3-4}, \quad \Delta B_4 = \Delta G_3. \end{aligned} \quad (13)$$

Передаточные коэффициенты, необходимые для решения системы уравнений (IV) и определения приращения натяжений между клетями редуционно-калибрующего блока $\Delta\sigma_{1-2}$, $\Delta\sigma_{2-3}$ и $\Delta\sigma_{3-4}$, находятся по уравнениям (5)–(8) для каждой клетки.

Так, коэффициент K_{H1} для первой клетки будет равен:

$$K_{H1} = \left(\frac{1}{1+S_1} \frac{dS_1}{dH_1} + \frac{1}{b_1} \frac{db_1}{dH_1} - \frac{1}{1+S_2} \frac{db_1}{dH_1} \frac{dS_2}{dH_2} - \frac{1}{b_2} \frac{db_1}{dH_1} \frac{db_2}{dH_2} \right) \frac{1}{K\sigma_{1-2}},$$

а для третьей:

$$K_{H3} = \left(\frac{1}{1+S_3} \frac{dS_3}{dH_3} + \frac{1}{b_3} \frac{db_3}{dH_3} - \frac{1}{1+S_4} \frac{db_3}{dH_3} \frac{dS_4}{dH_4} - \frac{1}{1+b_4} \frac{db_3}{dH_3} \frac{db_4}{dH_4} \right) \frac{1}{K\sigma_{13-4}}.$$

Соответственно коэффициенты K_{B_i} для указанных клеток:

$$K_{B1} = \left(\frac{1}{b_1} - \frac{1}{1+S_2} \frac{\partial S_2}{\partial H_2} - \frac{1}{b_2} \frac{\partial b_2}{\partial H_2} \right) \frac{1}{K\sigma_{1-2}},$$

$$K_{B3} = \left(\frac{1}{b_3} - \frac{1}{1+S_4} \frac{\partial S_4}{\partial H_4} - \frac{1}{b_4} \frac{\partial b_4}{\partial H_4} \right) \frac{1}{K\sigma_{3-4}}.$$

Остальные передаточные коэффициенты для всех клеток редуционно-калибрующего блока определяются аналогично, используя уравнения (5)–(8).

Зная технологические коэффициенты и рассчитывая передаточные коэффициенты, можно решить системы уравнений (IV) и (V) и найти изменение размеров раската в любой клетке и на выходе из редуционно-калибрующего блока, а также изменение межклетьевого натяжения в любом промежутке. Режим натяжения между клетями блока в базовом режиме определяется по методике, приведенной в работе [11], а размеры раската в базовом режиме можно принимать в соответствии с таблицей калибровки валков блока. Технологические коэффициенты по натяжению принимаются по экспериментальным данным [4] или расчетным путем [7]. Коэффициенты db/dH_i и db/dh_i могут быть приняты по экспериментальным данным, полученным при прокатке углеродистой стали при температуре 800–

1000 °С в высокоскоростных блоках современных проволочных станов, при этом $\frac{\partial b_i}{\partial G_i} = \frac{\partial b_i}{\partial h_i}$. Опере-

жение в клетях редуционно-калибрующего блока и его зависимость от различных факторов рассчитываются по формулам, приведенным в работе [7], или по другим известным формулам, учитывающим ширину раската. Ширина и высота раската в клетях приняты по данным, предоставленным фирмой Морган для редуционно-калибрующего блока стана 150 РУП "БМЗ". Коэффициенты

$\frac{\partial b_i}{\partial H_i}$ также приняты по калибровке фирмы-изготовителя.

При определении технологических коэффициентов использованы абсолютные значения приращения высоты и ширины раската. Так, например, коэффициент dS/dH_i показывает, на сколько изменится опережение в i -й клетке при изменении максимальной начальной высоты раската, т.е. высоты сечения раската по оси, проходящей через вершину калибра, а коэффициент $db/d\sigma_{(i-1)-i}$ определяет изменение ширины раската по оси, проходящей по разьему калибра от приращения заднего натяжения и т.д.

При уменьшении размеров раската на входе в редуционно-калибрующий блок значения ΔH_i и ΔB_i имеют знак "–", при увеличении размеров – знак "+". Возмущения в клетях блока ΔG_i приняты как изменения межвалковых зазоров. При уменьшении зазоров величины ΔG_i подставляются со знаком "–", при увеличении – со знаком "+". При уменьшении диаметров валков, устанавливаемых в блок, относительно диаметров, указанных в калибровке и принятых за базовые, ΔD_i имеют знак "–", при увеличении диаметров – знак "+".

Численные значения технологических коэффициентов для первой клетки редуционно-калибрующего блока определяются для системы калибров "круг–овал", для второй клетки – для системы "овал–круг", для третьей и четвертой клеток – для системы "круг–круг".

Если исследуется влияние на технологический процесс прокатки изменения межвалковых зазоров

в клетях блока, то $\frac{\partial S_i}{\partial G_i} = \frac{\partial S_i}{\partial h_i}$, $\frac{\partial b_i}{\partial G_i} = \frac{\partial b_i}{\partial h_i}$, а коэффициенты $\frac{\partial h_i}{\partial G_i} = 1,0$.

Если при расчетах по формулам системы (IV) приращение межклетьевого усилия $\Delta\sigma_1$ имеет знак "+", это означает, что данные возмущения приводят к увеличению натяжения в данном промежутке; если $\Delta\sigma_1$ имеет знак "-" к уменьшению натяжения или при прокатке катанки больших диаметров - к увеличению подпора.

Численные значения технологических коэффициентов для всех клеток чистового высокоскоростного десятиклетьевого блока стандартного типа и рассчитанные величины передаточных коэффициентов и коэффициентов обратной связи по натяжению приведены в работе [12].

С помощью разработанной математической модели можно оценить влияние различных параметров - размеров раската после основного блока, диаметров валков и межвалковых зазоров на процесс непрерывной прокатки в редуционно-калибрующем блоке - изменение натяжений между клетями, размеров раската на выходе из каждой клетки и размеров готовой катанки при изменении указанных параметров. После подстановки технологических и передаточных коэффициентов и соответствующих вычислений окончательно изменение межклетьевых натяжений определяется решением системы уравнений (IV) после приведения изменений высоты и ширины раската на входе в каждую клетку к изменениям высоты и ширины на входе в редуционно-калибрующий блок.

В связи с высокой жесткостью клеток блока размеры раската определяются только изменением ширины (по разъему валков). Изменение ширины раската на выходе из клеток редуционно-калибрующего блока окончательно определяется решением следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_1 &= 0,76\Delta H_1 + B_1 - 0,76\Delta G_1 - 0,002\Delta\sigma_{1-2}, \\ \Delta b_2 &= 0,41\Delta H_1 + 0,54\Delta B_1 + 0,59\Delta G_1 - 0,54\Delta G_2 - 0,036\Delta\sigma_{1-2} - 0,003\Delta\sigma_{2-3}, \\ \Delta b_3 &= 0,115\Delta H_1 + 0,151\Delta B_1 + 0,165\Delta G_1 + 0,849\Delta G_2 - 0,01\Delta\sigma_{1-2} - 0,021\Delta\sigma_{2-3} - 0,28\Delta G_3 - 0,002\Delta\sigma_{3-4}, \\ \Delta b_4 &= 0,032\Delta H_1 + 0,042\Delta B_1 + 0,046\Delta G_1 + 0,238\Delta G_2 + 0,92\Delta G_3 - 0,28\Delta G_4 - 0,0028\Delta\sigma_{1-2} - 0,0058\Delta\sigma_{2-3} - \\ &\quad - 0,015\Delta\sigma_{3-4}. \end{aligned} \right\} \text{(VI)}$$

Изменения натяжений $\Delta\sigma_{1-2}$, $\Delta\sigma_{2-3}$ и $\Delta\sigma_{3-4}$ в уравнения системы (VI) подставляются в Н/мм².

Расчеты, выполненные по уравнениям систем (IV) и (VI) при неизменных межвалковых зазорах в клетях редуционно-калибрующего блока и сечении подката перед блоком, показали, что изменение диаметра валков в клетях оказывает влияние на режим натяжений и размеры раската на выходе из клеток и размеры готовой катанки. Увеличение диаметра валков во второй и третьей клетях увеличивает натяжения перед клетями и уменьшает ширину раската после этих клеток (рис. 1). При ΔD_2 и ΔD_3 менее 2 мм изменение натяжения в остальных промежутках незначительно, изменение ширины раската в предшествующих клетях примерно в 4-5 раз меньше, чем на выходе из клетки, в которой произошло изменение диаметра валков. При $\Delta D_2 = \Delta D_3 = \pm 2$ мм и менее ширина готовой катанки изменяется незначительно - $\Delta b_4 \leq \pm 0,015$ мм (рис. 1). Реакция натяжения до клетки с измененным диаметром валков, противоположная по знаку изменению натяжения после клетки, передаваясь по ходу прокатки, уменьшает реакцию натяжения и реакцию ширины после этой клетки.

Наибольшее влияние на режим натяжений в редуционно-калибрующем блоке и ширину готовой катанки оказывает изменение диаметров валков в первой и последней клетях блока, однако это влияние противоположно по знаку. Так, уменьшение диаметра валков в первой клетке приводит к увеличению натяжений во всех промежутках и уменьшению ширины раската во всех клетях

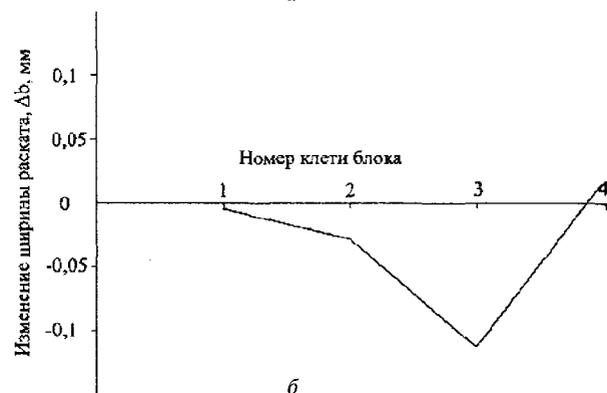
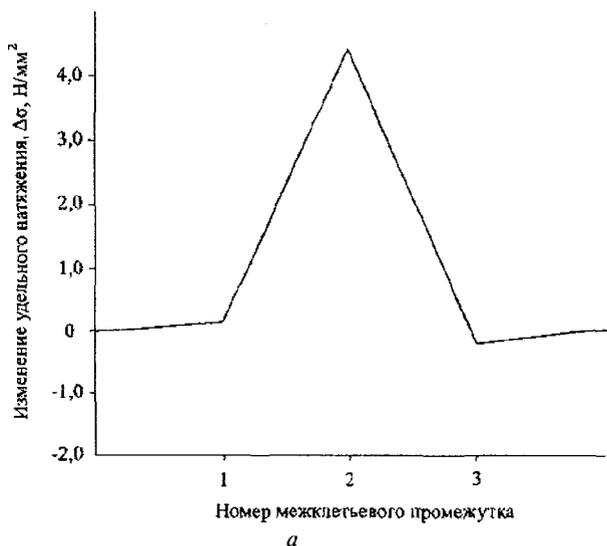


Рис. 1. Изменение режима натяжений между клетями (а) и ширины раската на входе из клеток (б) редуционно-калибрующего блока стана 150 РУП «БМЗ» при увеличении диаметра валков третьей клетки блока на 2 мм

блока (рис. 2). Уменьшение диаметра валков в последней клетке снижает уровень натяжений во всех межклетьевых промежутках, при этом реакция натяжения и ширины раската увеличивается по ходу прокатки. На рис. 2 показана зависимость изменения ширины готовой катанки от ΔD_1 и ΔD_4 . Увеличение изменения диаметра валков в первой клетке увеличивает ширину катанки на выходе из блока, а увеличение изменения диаметра валков в последней клетке уменьшает ширину готовой катанки. Влияние ΔD в последней клетке на натяжение и ширину катанки несколько больше, чем влияние ΔD_1 . Возмущения, вызываемые изменением D_1 , больше возмущений, вызываемых изменением D_2 и D_3 . Это объясняется отсутствием продольных усилий перед редуционно-калибрующим блоком и их влиянием на процесс непрерывной прокатки в последующих клетках. По этой же причине реакция ширины раската противоположна по знаку реакции, вызываемой изменением диаметра валков последующих клетей. Диаметры валков, устанавливаемых в клетке, оказывают влияние на ширину полосы только за счет изменения натяжения в межклетьевых промежутках блока. При ΔD_1 и ΔD_4 , равных 1 мм и менее, ширина готовой катанки изменяется незначительно – не более чем на $\pm 0,015$ мм. Учитывая особенности калибровки двух последних клетей (система "круг-круг"), при ΔD более 1 мм возможно переполнение круглого калибра четвертой клетей и появление "усов" на готовом профиле.

Существенное влияние на режим натяжений в редуционно-калибрующем блоке и точность готовой катанки оказывают сечение раската на входе в блок и изменение межвалковых зазоров в клетках блока, интенсивность влияния которых определяется величиной коэффициентов перед ΔH_1 и ΔB_1 и $\Delta G_1 = \Delta G_4$. Из системы уравнений (IV) следует, что с увеличением среднего диаметра подката перед блоком $\Delta d_{o.ср.} = \Delta H_1 = \Delta B_1$ снижается уровень натяжений в блоке с убывающей интенсивностью по ходу прокатки.

Суммы произведений $(0,658\Delta H_1 + 0,668\Delta B_1)$, $(0,452\Delta H_1 + 0,502\Delta B_1)$ и $(0,104\Delta H_1 + 0,116\Delta B_1)$ в системе (IV) показывают влияние размеров подката на режим натяжений в блоке при свободной прокатке, т.е. без учета влияния изменения натяжений в предшествующих и последующих промежутках. Так, влияние $\Delta d_{o.ср.}$ на приращение натяжения в первом промежутке $\Delta \sigma_{1-2}$ при свободной прокатке примерно в 6 раз больше, чем в последнем промежутке $\Delta \sigma_{3-4}$. Увеличение диаметра раската на входе в блок снижает уровень натяжений, а уменьшение диаметра – увеличивает $\Delta \sigma_{1-2}$, $\Delta \sigma_{2-3}$ и $\Delta \sigma_{3-4}$. Чем больше диаметр подката на входе в блок, тем больше ширина раската на выходе из клетей блока и ширина готовой катанки.

Приняв $\Delta D_1 = \Delta D_4 = 0$ и $\Delta G_1 = G_4 = 0$, рассчитаем изменение режима натяжений в блоке при $\Delta H_1 = \Delta B_1 = 0,2$ мм. В первом межклетьевом промежутке в соответствии с системой уравнений (IV) за счет увеличения размеров сечения на входе в блок натяжение уменьшается на $2,65$ Н/мм². При этом влияние изменения натяжения во втором промежутке на $\Delta \sigma_{1-2}$ невелико (коэффициент при $\Delta \sigma_{2-3}$ равен $0,055$). Суммарное изменение натяжения в первом промежутке составит $\Delta \sigma_{1-2} = -2,9$ Н/мм². На изменение натяжения между второй и третьей клетями большее влияние оказывает реакция натяжения $\Delta \sigma_{1-2}$ (коэффициент перед $\Delta \sigma_{1-2}$ равен $0,762$), которая, передаваясь "вперед" в последующий промежуток, в $3,5$ раза больше влияет на $\Delta \sigma_{2-3}$ по сравнению с влиянием размеров подката при свободной прокатке. Изменение натяжения в последующем промежутке (между третьей и четвертой клетями), передаваясь "назад" в предыдущий промежуток, значительно меньше влияет на $\Delta \sigma_{2-3}$, однако за счет влияния натяжения между первой и второй клетями и передачи $\Delta \sigma_{1-2}$ в последующий промежуток суммарное изменение $\Delta \sigma_{2-3}$ при увеличении диаметра подката на $0,2$ мм будет больше, чем в промежутке между первой и второй клетями. В третьем промежутке изменение натяжения $\Delta \sigma_{3-4}$ происходит в основном за счет передачи натяжения из предшествующих промежутков.

На рис. 3 показано изменение ширины раската на выходе из клетей редуционно-калибрующего блока при увеличении среднего диаметра подката на $0,2$ мм.

Изменение диаметра подката оказывает влияние на ширину раската в калибрующих клетях блока через натяжения в двух последних межклетьевых промежутках. Отклонение диаметра подката на входе

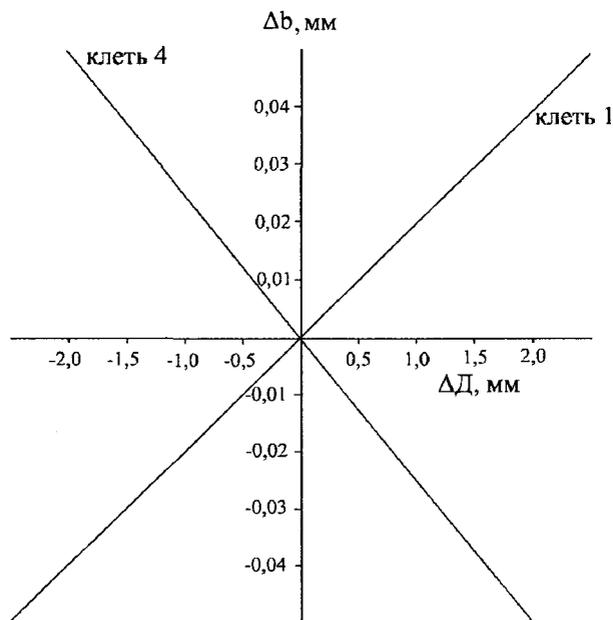


Рис. 2. Влияние изменения диаметра валка первой и последней клетей редуционно-калибрующего блока стана 150 РУП «БМЗ» на ширину готовой катанки

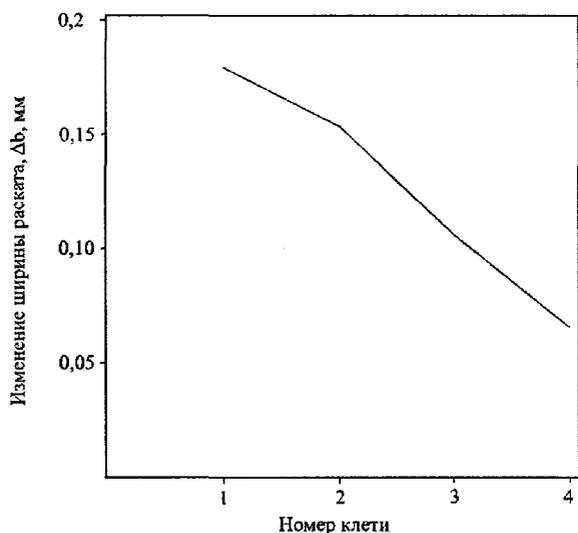


Рис. 3. Влияние увеличения среднего диаметра раската на 0,2 мм перед редуционно-калибрующим блоком стана 150 РУП «БМЗ» на ширину раската по клетям блока

Приняв неизменными сечение подката перед блоком и диаметры валков по его клетям, решением систем уравнений (IV) и (VI) определено влияние изменения межвалковых зазоров в редуцирующих и калибрующих клетях на режим натяжений и ширину раската по клетям блока.

На рис. 4 показано влияние уменьшения межвалковых зазоров в клетях блока на $\Delta\sigma_{1-2} \dots \Delta\sigma_{3-4}$ и $\Delta b_1 \dots \Delta b_4$ при $\Delta H_1 = \Delta B_1 = 0$ и $\Delta D_1 \dots \Delta D_4 = 0$.

Уменьшение межвалкового зазора на 0,2 мм в первой клетке редуционно-калибрующего блока приводит к некоторому снижению межклетьевого натяжения в первом промежутке и увеличению на 0,15 мм ширины раската на выходе из этой клетки за счет увеличения вытяжки и опережения в этой клетке. При этом основное влияние на реакцию ширины оказывает увеличение обжатия. Влияние $\Delta\sigma_{1-2}$ на Δb_1 несущественно. Уменьшение площади поперечного сечения на выходе из первой клетки и на входе во вторую клетку увеличило удельное натяжение во втором и в меньшей степени в третьем промежутках блока. На выходе из второй клетки ширина раската уменьшалась на 0,1 мм. Это происходит в основном за счет уменьшения ширины раската на входе в эту клетку ($\Delta G_1 = -0,2$ мм) несмотря на увеличение обжатия за счет приращения ширины Δb_1 . Изменение ширины после второй клетки за счет некоторого снижения $\Delta\sigma_{1-2}$ оказалось меньше, чем ΔG_1 . Влияние изменения ΔG_1 на $\Delta\sigma$ и Δb уменьшается по ходу прокатки. На выходе из последней клетки блока ширина катанки уменьшилась на 0,03 мм. Чем больше межвалковый зазор во второй клетке, тем меньше натяжение во втором и третьем межвалковых промежутках и больше ширина готовой катанки.

Уменьшение межвалкового зазора во второй клетке редуционно-калибрующего блока снижает удельные натяжения во всех промежутках (рис. 4, б). Вследствие увеличения обжатия во второй клетке и уменьшения натяжения перед этой клетью возрастает ширина раската на выходе из второй клетки. Несмотря на уменьшение натяжения между второй и третьей клетями, что должно привести к увеличению ширины раската на выходе из третьей клетки, уменьшение ширины на входе в третью клетку ($\Delta G_2 = -0,2$ мм) оказывает большее влияние. Поэтому ширина раската на выходе из третьей клетки уменьшилась на 0,1 мм, а ширина готовой катанки — на 0,025 мм.

Уменьшение зазора между валками в третьей клетке снижает уровень натяжения во всех промежутках блока (рис. 4, в). Наибольшее влияние ΔG_3 оказывает на натяжение в промежутке между второй и третьей клетями, несколько меньшее — на σ_{3-4} . В результате при $\Delta G_3 = -0,2$ мм и увеличения $\Delta\sigma_{2-3}$ ширина на выходе из третьей клетки увеличилась на 0,13 мм. На ширину готовой катанки, несмотря на увеличение обжатия в последней клетке за счет большей ширины на выходе из третьей клетки, большее влияние оказало уменьшение ширины раската на входе в четвертую клетку и увеличение натяжения между третьей и четвертой клетями. В результате ширина катанки уменьшилась на 0,13 мм.

Изменение межвалкового зазора в последней клетке блока оказывает наибольшее влияние на натяжение в последнем межклетьевом промежутке и ширину готовой катанки. Уменьшение межвалкового зазора в четвертой клетке снижает уровень натяжения в последнем межклетьевом промежутке, увеличение зазора — увеличивает. При уменьшении зазора $\Delta G_4 = -0,2$ мм увеличивается ширина готовой катанки как за счет уменьшения удельного натяжения в последнем промежутке, так и за счет увеличения обжатия в последней клетке (рис. 4, г), суммарное влияние которых составило $\Delta b_4 = +0,09$ мм.

в блок $d_{o, cp}$ уменьшается по ходу прокатки в 3 раза и на готовой катанке при $\Delta d_{o, cp} = \pm 0,2$ мм составляет $\pm 0,065$ мм. Как показал многолетний опыт эксплуатации чистового блока стана 150 РУП «БМЗ» и блоков, установленных на зарубежных станах, технология обеспечивает устойчивое производство катанки с точностью $\pm 0,15-0,20$ мм. Применение редуционно-калибрующих блоков по результатам математического моделирования дает возможность уменьшить отклонения размеров готовой катанки до $\pm 0,05-0,065$ мм, при этом должны быть соблюдены правила эксплуатации блоков (настройка клетей, соотношения диаметров валков, точность подката на входе в редуционно-калибрующий блок, температурный режим прокатки и др.). Возможность повышения точности катанки до $\pm (0,05-0,07)$ мм экспериментально показана при исследовании технологии прокатки на новых проволочных станах в Китае и Бразилии, оборудованных четырехклетьевыми редуционно-калибрующими блоками [1].

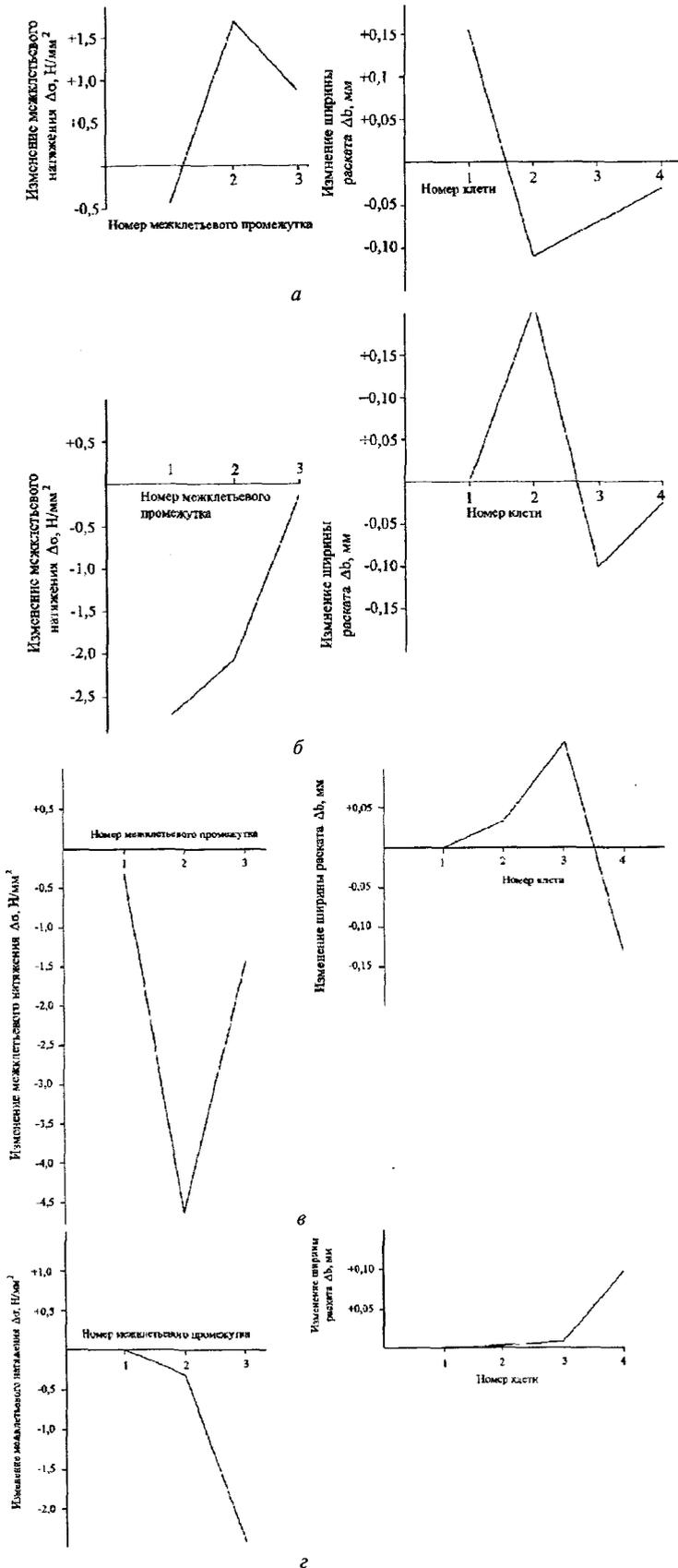


Рис. 4. Влияние изменения межвалковых зазоров на натяжение и ширину раската по клетям редуционно-калибрующего блока стана 150 РУП «БМЗ»: а - $\Delta G_1 = -0,2$ мм, $\Delta G_2 = \Delta G_3 = \Delta G_4 = 0$; б - $\Delta G_2 = -0,2$ мм, $\Delta G_1 = \Delta G_3 = \Delta G_4 = 0$; в - $\Delta G_3 = -0,2$ мм, $\Delta G_1 = \Delta G_2 = \Delta G_4 = 0$; г - $\Delta G_4 = -0,2$ мм, $\Delta G_1 = \Delta G_2 = \Delta G_3 = 0$

На рис. 5 показано влияние регулировки межвалкового зазора в последней и предпоследней клетях редуционно-калибрующего блока на ширину готовой катанки на выходе из четвертой клетки.

Противоположное по знаку влияние межвалковых зазоров в предпоследней и последней клетях редуционно-калибрующего блока на ширину готовой катанки объясняется в первом случае преимущественным влиянием исходной ширины раската на входе в последнюю клетку блока, а во втором — влиянием межклетьевого натяжения в последнем промежутке и обжатия в последней клетке.

Таким образом, теоретический анализ процесса непрерывной прокатки в редуционно-калибрующем блоке, выполненный с помощью разработанной математической модели, позволил установить наиболее существенные факторы, влияющие на режим натяжений и размеры раската по клетям блока и точность готовой катанки, а также определить рациональные регулирующие воздействия на процесс. Изменение диаметра валков более чем на 1 мм в какой-либо клетке оказывает существенное влияние на натяжения до и после этой клетки, в остальных промежутках это влияние незначительно. Больше влияние на размеры катанки оказывает изменение диаметров валков в первой и последней клетях блока. Увеличение диаметра валков в первой и уменьшение его в последней клетке увеличивают горизонтальный диаметр катанки, однако это влияние невелико. При изменении диаметров валков в нескольких клетях в неблагоприятных случаях, когда реакции натяжения и ширины раската на изменение диаметров складываются, может произойти снижение точности прокатки. Поэтому различие в диаметрах валков, устанавливаемых в редуцирующие клетки, не должно превышать 0,5 мм, а в калибрующие клетки — 0,3 мм.

Изменение сечения подката на входе в редуционно-калибрующий блок и изменение межвалковых зазоров по клетям блока являются самыми сильными возмущениями, оказывающими влияние на режим натяжений в блоке и точность готовой катанки. Увеличение сечения подката на входе в блок уменьшает уровень межклетьевого натяжения и увеличивает горизонтальный диаметр катанки, уменьшение площади поперечного сечения на входе в блок увеличивает натяжения в блоке и уменьшает горизонтальный диаметр катанки. Показано, что при отклонении сред-

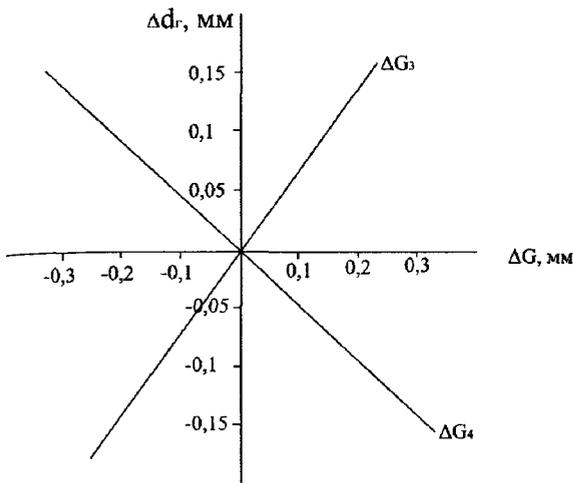


Рис. 5. Влияние изменения межвалкового зазора в предпоследней и последней клетях редуционно-калибрующего блока стана 150 РУП «БМЗ» на горизонтальный диаметр катанки

Изменение межвалковых зазоров в этих клетях увеличивает ширину готовой катанки, уменьшение зазоров — уменьшает. Изменение межвалковых зазоров в редуцирующих клетях может быть использовано в качестве регулирующих воздействий на процесс прокатки и точность катанки. В первой калибрующей клетке межвалковый зазор может регулироваться в пределах $\pm 0,3$ мм, во второй — в пределах $\pm 0,2$ мм. Наибольшее влияние на режим натяжений, а также на горизонтальный диаметр катанки оказывает изменение зазора в третьей калибрующей клетке блока. Уменьшение зазора в третьей калибрующей клетке уменьшает натяжение в предшествующем промежутке перед третьей клетью и, передаваясь «вперед» по ходу прокатки, в промежутке между третьей и четвертой клетями, уменьшает горизонтальный диаметр катанки. Изменение зазора между валками в четвертой калибрующей клетке влияет на натяжение и ширину катанки в меньшей степени. Влияние изменения зазоров в последней и предпоследней клетях на горизонтальный диаметр противоположно по знаку — увеличение зазора в третьей калибрующей клетке увеличивает d_r , а в четвертой — уменьшает. Регулировка зазоров в калибрующих третьей и четвертой клетях может являться средством для управления процессом непрерывной прокатки в блоке и точностью катанки. При этом изменение зазоров в калибрующих клетях во избежание переполнения последнего калибра или увеличения овальности катанки не должно превышать $\pm 0,15$ мм.

Совместное влияние регулировки межвалковых зазоров в нескольких калибрующих клетях можно представить как сумму реакций на воздействия каждой калибрующей клетки, при этом необходимо учитывать отклонения размеров подката и диаметров валков, устанавливаемых в калибрующей клетке блока. Для обеспечения стабильности процесса и исключения переполнения калибра четвертой калибрующей клетки необходимо настраивать на вертикальный диаметр $G_4 = d_n + 0,1$ мм, где d_n — номинальный диаметр катанки, а регулировку межвалкового зазора следует производить с учетом отклонений других параметров от заданных калибровкой валков.

Результаты математического моделирования и рекомендации по управлению процессом непрерывной прокатки в редуционно-калибрующем блоке использовали при разработке правил эксплуатации и освоении редуционно-калибрующего блока стана 150 РУП «БМЗ».

Кроме того, разработанное средство аналитических исследований процесса высокоскоростной прокатки в редуционно-калибрующем блоке современного проволочного стана, а также результаты выполненных исследований могут использоваться для определения путей дальнейшего развития существующих станов при минимальных затратах на реконструкцию или модернизацию. Это позволит улучшить качество катанки и технико-экономические показатели ее производства, снизить затраты по дальнейшей переработке катанки в метизном и сталепроволочном переделе. В целом это будет способствовать повышению конкурентоспособности готовой продукции проволочных станов на мировом рынке.

Литература

1. Лимпер Х.-Г. Новые технологии производства катанки // VI конгресс прокатчиков 17–20.10.2005 г. Рекламный проспект фирмы SMS Meer. ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», Липецк. С. 1–21.
2. Особенности реконструкции хвостовой части проволочного стана 150 Белорусского металлургического завода / Н.В. Андрианов, В.А. Маточкин, Н.И. Анелькин и др. // Литье и металлургия. 2007. № 1. С. 43–46.
3. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Металлургия, 1967.

него диаметра раската на входе в блок не более $\pm 0,2$ мм возможно получение катанки с точностью менее $\pm 0,1$ мм. Это согласуется с результатами измерения размеров катанки на станах, построенных за рубежом в последние годы и оборудованных редуционно-калибрующими блоками.

Наибольшее уменьшение отклонений размеров исходного подката происходит в калибрующих клетях. Это объясняется малыми обжатиями и применением калибровки системы «круг–круг», имеющей большую площадь контакта калибра с раскатом. В то же время следует обратить внимание на то, что прокатка подката с плюсовым допуском может приводить к переполнению круглых калибров.

Изменение межвалкового зазора в редуцирующих клетях блока в пределах $\pm 0,2$ мм влияет на режим натяжений во всех межклетевых промежутках, однако это влияние на горизонтальный диаметр незначительно и составляет не более $\pm 0,03$ мм. Увеличение межвалковых зазоров в этих клетях увеличивает ширину готовой катанки, уменьшение зазоров — уменьшает.

4. Чекмарев А.П., Топоровский М.П. Взаимосвязь клетей и промежутков между ними на непрерывном мелко-сортом стане // Сб. науч. тр. ИЧМ "Прокатное производство". М.: Metallurgija, 1967. Т. 22. С. 5–64.
5. Чекмарев А.П., Спиридонов Н.П., Куцыгин М.Д. Анализ уравнений связи между клетями непрерывного стана при трехмерной деформации // Сб. науч. тр. ИЧМ "Прокатное производство". М.: Metallurgija, 1969. Т. 29. С. 90–104.
6. Чекмарев А.П., Чернобривенко Ю.С., Куцыгин М.Д. Расчет натяжения при непрерывной прокатке // Сб. науч. тр. ИЧМ "Прокатное производство". М.: Metallurgija, 1971. Т. 35. С. 227–237.
7. Чекмарев А.П., Спиридонов Н.П., Куцыгин М.Д. Аналитическое определение технологических коэффициентов влияния натяжения и различных возмущений на параметры непрерывной прокатки // Сб. науч. тр. ИЧМ "Прокатное производство". М.: Metallurgija, 1971. Т. 35. С. 216–226.
8. Чекмарев А.П., Топоровский М.П. Деформация полосы между клетями непрерывного стана // Сб. науч. тр. ИЧМ "Прокатное производство". М.: Metallurgija, 1969. Т. 29. С. 191–197.
9. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.П. Процесс непрерывной прокатки. М.: Metallurgija, 1970.
10. Иводитов А.Н., Горбанев А.А. Разработка и освоение технологии производства высококачественной катанки. М.: Metallurgija, 1989.
11. Gorbanew A.A., Binkevich E.V., Mamuzic I. Regulation of forces in inter-stand spring by rolling in finishing blocks of wire roll stands // Metalurgija, 1998. Vol. 37. N 3. P. 153–157.
12. Теоретическое исследование процесса непрерывной прокатки в чистовых блоках проволочных станов / А.А.Горбанев, Д.А.Деркач, А.П.Лохматов и др.: Деп. в ин-те "Черметинформация", № 3Д/3373. 1986. № 7.