



*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;  $\sigma_0$  и  $\sigma_1$  – 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} &= b \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 межклетьевого 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;  $K_H, K_B, K_G, K_{\sigma_{(i-1)-i}}, K_{\sigma_{(i+1)-(i+2)}}$  – передаточные коэффициенты для межклетьевого 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  $\Delta H_1$  и  $\Delta B_1$ , 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  $\Delta b_0$  и  $\Delta h_0$  – 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

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

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

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

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  $\Delta H_i$  и  $\Delta B_i$  имеют знак "–", при увеличении размеров – знак "+". Возмущения в клетях блока  $\Delta G_i$  приняты как изменения межвалковых зазоров. При уменьшении зазоров величины  $\Delta G_i$  подставляются со знаком "–", при увеличении – со знаком "+". При уменьшении диаметров валков, устанавливаемых в блок, относительно диаметров, указанных в калибровке и принятых за базовые,  $\Delta D_i$  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/мм<sup>2</sup>.

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  $\Delta D_2$  и  $\Delta D_3$  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

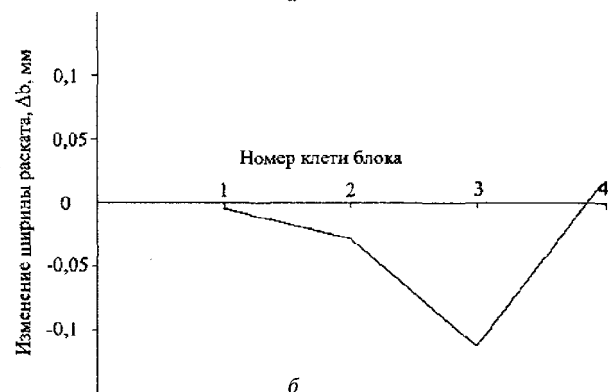
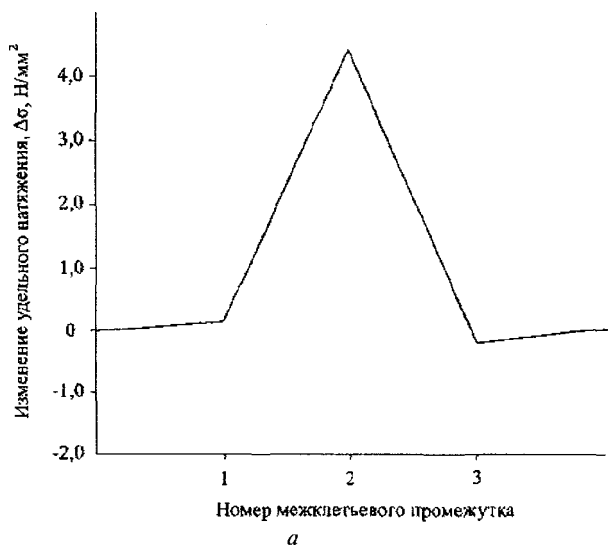


Рис. 1. Изменение режима натяжений между клетями (а) и ширины раската на входе из клеток (б) редуционно-калибрующего блока стана 150 РУП «БМЗ» при увеличении диаметра валков третьей клетки блока на 2 мм

блока (рис. 2). Уменьшение диаметра валков в последней клетке снижает уровень натяжений во всех межклетевых промежутках, при этом реакция натяжения и ширины раската увеличивается по ходу прокатки. На рис. 2 показана зависимость изменения ширины готовой катанки от  $\Delta D_1$  и  $\Delta D_4$ . 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  $\Delta D$  в последней клетке на натяжение и ширину катанки несколько больше, чем влияние  $\Delta D_1$ . 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 межклетевых промежутках блока. При  $\Delta D_1$  и  $\Delta D_4$ , 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  $\Delta D$  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  $\Delta H_1$  и  $\Delta B_1$  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 межклетевом промежутке в соответствии с системой уравнений (IV) за счет увеличения размеров сечения на входе в блок натяжение уменьшается на  $2,65$  Н/мм<sup>2</sup>. 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/мм<sup>2</sup>. 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 межклетевых промежутках. Отклонение диаметра подката на входе

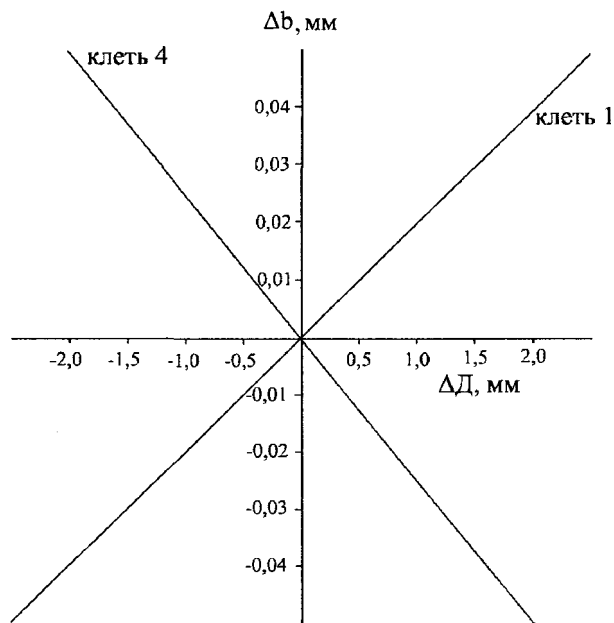


Рис. 2. Влияние изменения диаметра валка первой и последней клетей редуционно-калибрующего блока стана 150 РУП «БМЗ» на ширину готовой катанки



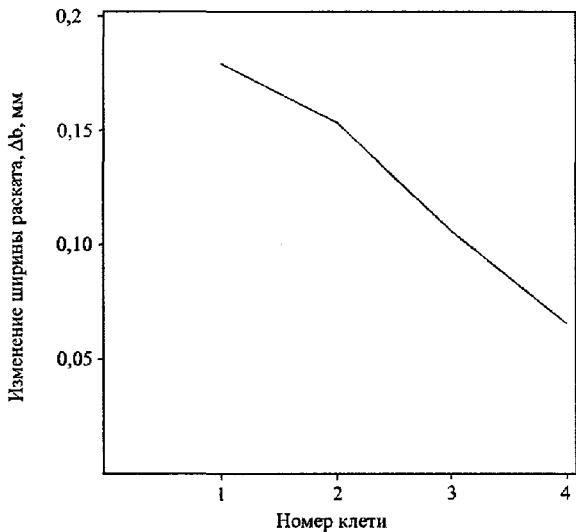


Рис. 3. Влияние увеличения среднего диаметра раската на 0,2 мм перед редуционно-калибрующим блоком стана 150 РУП «БМЗ» на ширину раската по клетям блока

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  $\Delta b_1$  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  $\Delta b_1$ . Изменение ширины после второй клетки за счет некоторого снижения  $\Delta\sigma_{1-2}$  оказалось меньше, чем  $\Delta G_1$ . Влияние изменения  $\Delta G_1$  на  $\Delta\sigma$  и  $\Delta b$  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  $\Delta G_3$  оказывает на натяжение в промежутке между второй и третьей клетями, несколько меньшее — на  $\sigma_{3-4}$ . 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  $d_{0\text{,cp}}$  уменьшается по ходу прокатки в 3 раза и на готовой катанке при  $\Delta d_{0\text{,cp}} = \pm 0,2$  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].

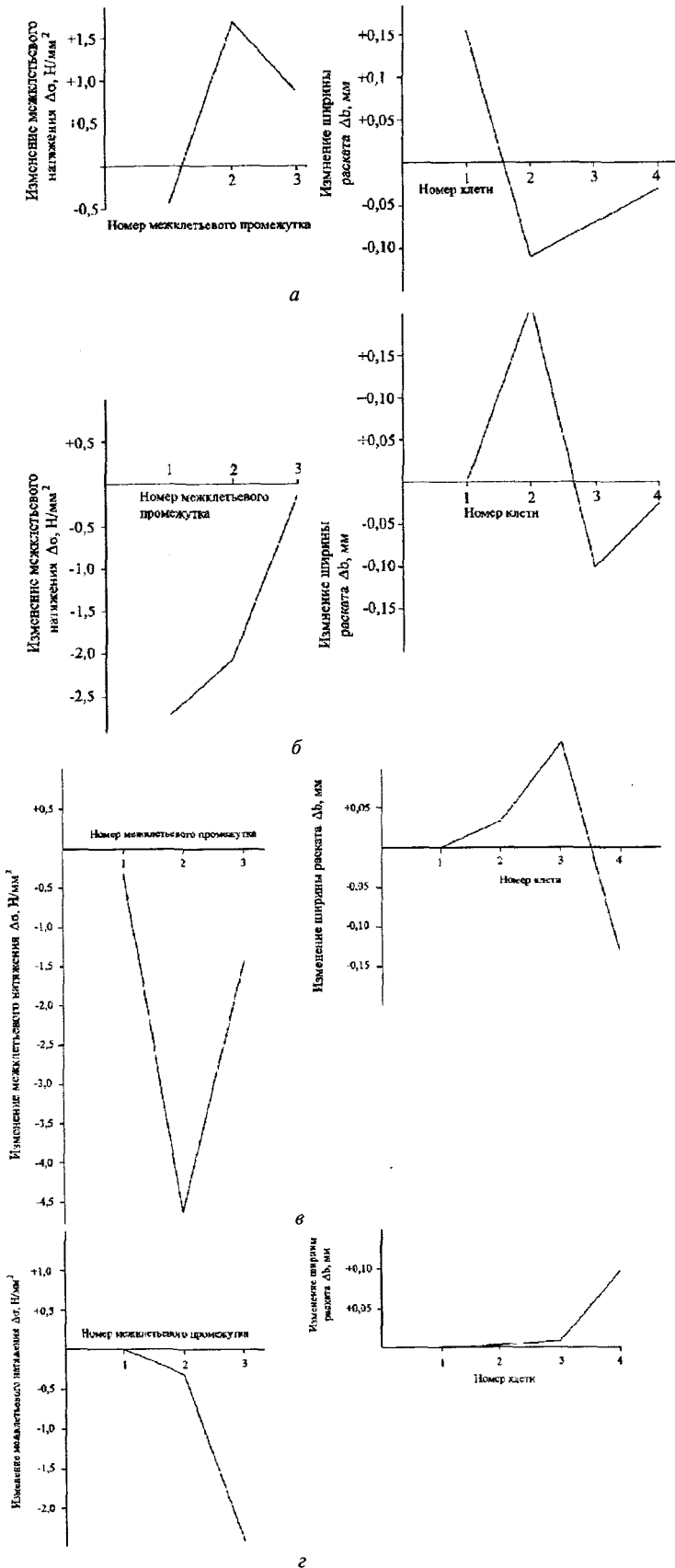


Рис. 4. Влияние изменения межвалковых зазоров на натяжение и ширину раската по клетям редуционно-калибрующего блока стана 150 РУП «БМЗ»: а -  $\Delta G_1 = -0,2$  мм,  $\Delta G_2 = \Delta G_3 = \Delta G_4 = 0$ ; б -  $\Delta G_2 = -0,2$  мм,  $\Delta G_1 = \Delta G_3 = \Delta G_4 = 0$ ; в -  $\Delta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

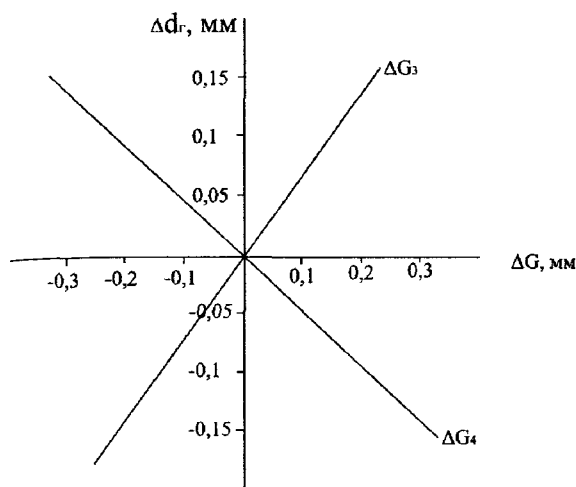


Рис. 5. Влияние изменения межвалкового зазора в предпоследней и последней клетях редуционно-калибрующего блока стана 150 РУП «БМЗ» на горизонтальный диаметр катанки

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 клетке межвалковый зазор может регулироваться в пределах  $\pm 0,3$  мм, во второй клетке — в пределах  $\pm 0,2$  мм. Наибольшее влияние на режим натяжений, а также на горизонтальный диаметр катанки оказывает изменение зазора в третьей клетке — первой калибрующей клетке блока. Уменьшение зазора в третьей 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 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 клетке увеличивает  $d_r$ , а в четвертой клетке — 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 клетях можно представить как сумму реакций на воздействия каждой клетки, при этом необходимо учитывать отклонения размеров подката и диаметров валков, устанавливаемых в клетке блока. Для обеспечения стабильности процесса и исключения переполнения калибра четвертой клетки последнюю клетку 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.: Metallurgia, 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.: Metallurgia, 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.: Metallurgia, 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.: Metallurgia, 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.: Metallurgia, 1969. Т. 29. С. 191–197.
9. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.П. Процесс непрерывной прокатки. М.: Metallurgia, 1970.
10. Иводитов А.Н., Горбанев А.А. Разработка и освоение технологии производства высококачественной катанки. М.: Metallurgia, 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 станков / А.А.Горбанев, Д.А.Деркач, А.П.Лохматов и др.: Деп. в ин-те "Черметинформация", № ЗД/3373. 1986. № 7.