



Analytical investigations of workloads of the RUP «BMZ» mill 320 working stands at rolling of fittings of slugs with section 140×140 mm using the system of minimum tension are carried out.

*В. Н. КУБАЕВ, Национальный горный университет,
П. В. ТОКМАКОВ, К. Ю. КЛЮЧНИКОВ, П. А. КИСЕЛЕВ, ИЧМ НАН Украины,
О. М. КИРИЛЕНКО, А. В. РУСАЛЕНКО, В. В. ГОРДИЕНКО, РУП «БМЗ»*

УДК 621.771

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЗОК РАБОЧИХ КЛЕТЕЙ СТАНА 320 РУП «БМЗ» ПРИ ПРОКАТКЕ АРМАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ЗАГОТОВКИ УВЕЛИЧЕННОГО СЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ МИНИМАЛЬНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Стан 320 РУП «Белорусский металлургический завод» использует процесс многоручьевого прокатки разделения (МНР) с применением неприводных деформационно-делительных устройств (НДДУ) в две, три, четыре и пять ниток, что обеспечивает значительный рост производительности стана без увеличения количества задействованных в процессе прокатки рабочих клеток.

В настоящее время стан 320 РУП «БМЗ» производит арматурный прокат периодического профиля: № 22–32 – в одну нитку; № 18 и 20 – МНР в две нитки; № 14, 16 – МНР в три нитки; № 12 – МНР в четыре нитки и № 10 – МНР в пять ниток.

Дальнейший рост производительности стана и снижение расхода металла на производство 1 т арматурного проката достигнуто за счет перехода на исходную заготовку увеличенного сечения без увеличения установленной мощности стана. Так, переход на производство основного сортамента арматурных профилей № 10–32 из исходных заготовок сечением 140×140 мм позволил снизить значения расходных коэффициентов и выход немерной длины готового проката.

Обеспечивая полную загрузку существующих производственных мощностей на РУП «БМЗ», особое внимание уделено повышению производства арматурного проката, пользующегося повышенным спросом на мировом рынке. До недавнего времени производство основного сортамента на непрерывном мелкосортном стане 320 РУП «БМЗ» осуществлялось из исходных заготовок квадрата сечением 125×125 мм.

В середине 2006 г. была начата и в марте 2007 г. успешно завершена работа по переходу на производство арматурных профилей № 10–32 из непрерывнолитых заготовок сечением 140×140 мм марок стали 3сп, 3Гсп (№ 10–32) и 25Г2С (№ 10, 12, 14). Опробованная технология на опытных прокатках периодических профилей основного сортамента, производимого станом 320, по вновь разработанным таблицам калибровок позволила с минимальными потерями по отношению к производству арматурного проката из исходной заготовки сечением 125×125 мм повысить производительность стана на 17% с одновременным снижением расходных коэффициентов без изменения качества готового проката.

Преимуществом производства арматурного проката из исходных заготовок сечением 140×140 мм является увеличение суммарной вытяжки (λ_{Σ}) по каждому профилю в среднем в 1,26 раза по сравнению с производством из заготовок сечением 125×125 мм. Это способствует большей проработанности структуры металла при прокатке. Положительным моментом при освоении технологии производства арматурного проката из заготовок сечением 140×140 мм явилась разработка универсальных таблиц калибровок (ТК) без изменения калибров черновой группы клеток по отношению к ТК для прокатки из заготовок сечением 125×125 мм. Данное решение позволило в дальнейшем без простоя оборудования, связанного с перевалкой валков, использовать при производстве арматурного проката два размера исходных заготовок – сечени-

ями 125×125 мм (МНЛЗ-2) и 140×140 мм (МНЛЗ-1). За счет перераспределения относительного обжата в черновой группе клетей при прокатке заготовок сечением 140×140 мм нагрузки на клетях данной группы не превышают предельно допустимых.

Аналитические исследования параметров прокатки предпочтительных арматурных профилей (№ 10–20) сортамента стана 320, а также анализ проектной калибровки валков для прокатки арматурных профилей [1] позволили выявить недостатки технологии, в том числе причины повышенного износа калибров валков, поломки муфт и другие сбои в работе стана. Это позволило оценить загрузку главных приводов на основании экспериментальных исследований, выполненных в заводских условиях.

При установившемся режиме прокатки на посту управления (ПУ-2) снимали индикаторные показания нагрузок (отношения фактического к номинальному значению силы тока якоря электродвигателя) и линейной скорости прохождения металла по задействованным рабочим клетям стана. При прокатке фиксировали скорость прокатки по клетям, температуру раската по клетям, фактические размеры раската и катающий диаметр валков.

Осциллографирование крутящих моментов на моторных валах привода клетей позволило определить характер и величины перегрузок, обусловленные динамическими процессами в переходных фазах прокатки – при захвате, выбросе, захвате полюсы последующей за наблюдаемой клетью и др.

Для анализа изменения нагрузок в линиях главных приводов клетей стана были выполнены расчеты параметров деформации и энергосиловых параметров прокатки по действующим таблицам калибровки.

Расчеты проводили с использованием программного средства, разработанного специалистами прокатного отдела Института черной металлургии НАН Украины.

Отличительной особенностью этого программного средства, описывающего процесс непрерывной сортовой прокатки, является более строгий учет параметра, в значительной степени определяющего изменение напряжения текучести металла в клетях стана и в его межклетевых промежутках, а также температурного поля раската по длине стана.

При непрерывной прокатке процессы упрочнения и разупрочнения, определяющие величину напряжения текучести металла, протекают в условиях изменяющейся температуры прокатываемого металла, поэтому строгий учет температурного поля раската по длине стана весьма важен [2].

Структурная схема разработанного программного средства информационно-аналитической системы непрерывной сортовой прокатки показана на рисунке.

Информационно-аналитическую систему непрерывной сортовой прокатки составляют два основных блока: информационный и аналитический.

Информационный блок содержит основные сведения о технологических параметрах прокатки сортовых профилей в условиях конкретного непрерывного мелкосортного стана и включает в себя блок исходных данных и расчетный блок.

В блок исходных данных введены сведения о калибровке валков для прокатки профилей фактического сортамента стана. Представлены схемы расположения основного технологического оборудования и его технические параметры, а также сведения о размерном и марочном сортаменте прокатываемых профилей.

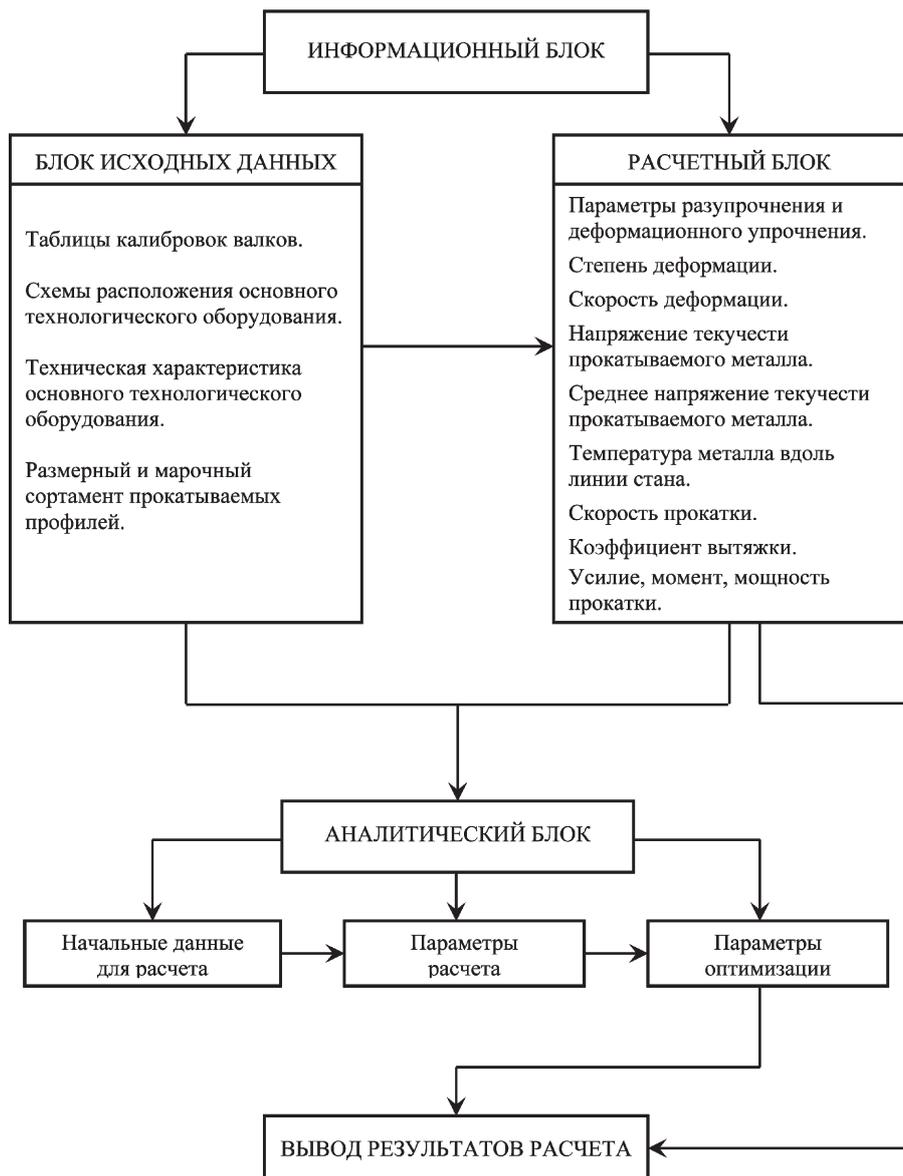
Алгоритм расчета обеспечивает последовательный расчет параметров каждой последующей рабочей клетки с учетом параметров прокатки в предыдущей клетю. Это особенно важно при расчете температуры прокатываемого металла, которая определяется с учетом разогрева металла в очаге деформации предыдущей клетки и последующего охлаждения в межклетевом промежутке перед каждой рассматриваемой клетю. Аналогичным образом рассчитываются скоростные параметры непрерывной прокатки [3].

Анализ результатов расчетов, выполненных с использованием разработанного программного средства, и сравнение их с фактическими данными показали, что разработанное средство достаточно точно и качественно верно описывает параметры процесса прокатки сортовых профилей в условиях непрерывного мелкосортного стана 320 РУП «БМЗ». Погрешность результатов расчета составляет 8–12% [4–6].

В приводных линиях клетей черновой группы стана 320 нагрузки при прокатке арматурных профилей носят статический характер.

На клетях, за которыми установлены кантующие проводки, кратковременный подъем крутящего момента на 25–30% вызван «утыканием» раската в кантующую проводку в начальный период кантовки.

Рассчитано, что при минимальной температуре начала прокатки 1050 °С максимальная нагрузка линий главных приводов клетей при прокатке арматурных профилей наблюдается в черновой группе стана и достигает 100–120% от номинального момента для редукторов в первой, второй и третьей рабочих клетях стана, 100–115% – в пя-



Структурная схема разработанного программного средства информационно-аналитической системы непрерывной сортовой прокатки

той рабочей клетки. В остальных клетях черновой группы эта величина не превышает 60–90% от допустимых значений. При рабочей температуре начала прокатки 1175–1185 °С нагрузка на первой – пятой клетях не превышает 55–65%, что подтверждается фактическими результатами при работе стана 320 РУП «БМЗ».

Загрузка приводов клеток промежуточной и чистой групп соответственно не превышает 85 и 35% допустимого момента. При этом вытяжная способность калибров арматурных профилей используется максимально.

Проведя анализ фактических нагрузок в линии рабочих клеток стана 320 РУП «БМЗ», прокатка предпочтительных профилей сортамента стана с использованием системы минимального натяжения происходит с большой неравномерностью

продольных напряжений в раскате. Неравномерность продольных межклетевых усилий приводит к неравномерной загрузке клеток, поэтому целесообразно разработать методику для расчета натяжений между клетями.

Основное уравнение связи между клетями непрерывной группы на основании закона постоянства секундных объемов записывается в следующем виде:

$$V_1 F_1 = V_2 F_2 = \dots = V_i F_i = C, \quad (1)$$

где V_i и F_i – скорость и площадь поперечного сечения полосы на выходе из i -й клетки; C – константа калибровки при непрерывной прокатке.

Уравнение постоянства секундных объемов (1) можно записать в виде

$$D_1 n_1 (1 + S_1) \mu_2 = D_2 n_2 (1 + S_2) = \dots = D_i n_i (1 + S_i). \quad (2)$$

Здесь D_1, D_2, \dots, D_i – катающие диаметры валков; S_1, S_2, \dots, S_i – опережение относительно диаметров валков; n_1, n_2, \dots, n_i – частота вращения валков клеток 1, 2, ..., i .

В случае, когда непрерывная группа состоит из нескольких клеток, для упрощения решения можно рассматривать последовательно каждые две клетки, начиная с первой, и в дальнейшем определять межклетьеовое натяжение во всех межклетьеовых промежутках. Так, для черновой группы стана 320 БМЗ, содержащей восемь клеток, система для расчета натяжений между клетями будет содержать семь уравнений, которые решаются совместно. Такой метод был применен для расчета параметров прокатки в чистовых блоках проволочных станов [7].

В работах А. П. Чекмарева, М. Д. Куцыгина и др. [8–11] показано, что при прокатке с натяжениями, не превышающими предела текучести полосы в межклетьеовом промежутке, зависимости параметров прокатки от удельного натяжения практически линейны либо без особых погрешностей могут быть приведены к линейным.

Поэтому для двух клеток непрерывной группы можно записать такие общие зависимости, как:

$$S_{i-1} = S_{o_{i-1}} + K_{S_{i-1}} \sigma, \quad (3)$$

$$S_i = S_{o_i} + K_{S_i} \sigma, \quad (4)$$

$$\mu_i = \mu_{o_i} + K_{\mu_i} \sigma. \quad (5)$$

Здесь $S_{o_{i-1}}, S_{o_i}, \mu_{o_i}$ – значения параметров при свободной прокатке; $K_{S_{i-1}}, K_{S_i}, K_{\mu_i}$ – технологические коэффициенты влияния натяжения на соответствующие параметры прокатки; σ – удельное натяжение между клетями $i-1$ и i .

Согласно выражениям (3)–(5), коэффициенты $K_{S_{i-1}}, K_{S_i}, K_{\mu_i}$ отражают количественную меру влияния натяжения на изменение параметров процесса прокатки. Чем меньше значения технологических коэффициентов, тем слабее влияние натяжения на соответствующие параметры процесса.

Подставляя выражения (3)–(5) в уравнение (2) и решая его относительно σ , после преобразований получаем:

$$\sigma = \frac{\frac{D_i}{D_{i-1}} \frac{n_i}{n_{i-1}} \frac{1+S_{o_i}}{1+S_{o_{i-1}}} \frac{1}{\mu_{o_i}} - 1}{\frac{K_{S_{i-1}}}{1+S_{o_{i-1}}} + \frac{K_{\mu_i}}{\mu_{o_i}} + \frac{D_i}{D_{i-1}} \frac{n_i}{n_{i-1}} \frac{K_{S_i}}{1+S_{o_{i-1}}} \frac{1}{\mu_{o_i}}}. \quad (6)$$

Выражение (6) для определения натяжения между двумя клетями при установившемся процессе прокатки можно получить решая уравнение натяжения, точная запись которого приведена в работе [12]:

$$d\sigma / dt = (V'_2 - V_1)(1 - \epsilon)^2 \frac{E}{l_o}, \quad (7)$$

где V'_2 – скорость входа полосы во вторую клеть; E – модуль упругости; l_o – расстояние между клетями; ϵ – упругое относительное удлинение полосы между клетями.

Интегрируя выражение (7), получаем выражение для расчета натяжения между клетями $i-1$ и i в виде:

$$\sigma = \frac{\frac{D_i}{D_{i-1}} \frac{n_i}{n_{i-1}} \frac{1+S_{o_i}}{1+S_{o_{i-1}}} \frac{1}{\mu_{o_i}} - 1}{K_{S_{i-1}} + K_{S_i} + K_{\mu_i}}. \quad (8)$$

Формула (8) для расчета натяжения по структуре проста, а точность расчета по ней достаточно высока. Из нее видна еще одна важная роль технологических коэффициентов. Находясь в знаменателе, они выражают компенсирующее влияние технологических параметров прокатки на величину удельного натяжения при рассогласовании скоростного режима. При одном и том же кинематическом рассогласовании натяжение будет выше в тех случаях, когда технологические коэффициенты меньше по абсолютной величине.

Скоростной режим прокатки характеризуется соотношением частот вращения валков n_2/n_1 и для двух клеток непрерывного стана связь кинематического натяжения с силовым является однозначной при постоянных технологических параметрах.

Режим прокатки считается согласованным, когда расчетное межклетьеовое натяжение равно нулю и отсутствует петля. Этому режиму соответствует определенное согласованное соотношение частот вращения валков смежных клеток, которое определяется из выражения (8). Приравняв σ нулю, получим

$$\left(\frac{n_i}{n_{i-1}} \right)_c = \mu_{o_i} \frac{D_{i-1}}{D_i} \frac{1+S_{o_{i-1}}}{1+S_{o_i}}. \quad (9)$$

Тогда формулу (8) можно привести к виду

$$\sigma = \frac{\frac{D_i}{D_{i-1}} \frac{1+S_{o_i}}{1+S_{o_{i-1}}} \frac{1}{\mu_{o_i}} \left[\frac{n_i}{n_{i-1}} - \left(\frac{n_i}{n_{i-1}} \right)_c \right]}{K_{S_{i-1}} + K_{S_i} + K_{\mu_i}}, \quad (10)$$

или

$$\sigma = \frac{\frac{D_i}{D_{i-1}} \frac{1+S_{o_i}}{1+S_{o_{i-1}}} \frac{1}{\mu_{o_i}} \epsilon}{K_{S_{i-1}} + K_{S_i} + K_{\mu_i}}, \quad (11)$$

где ϵ – кинематическое рассогласование.

Анализ уравнения (11) показывает, что при условии постоянства кинематического рассогласования натяжение может изменяться в определенных

пределах, которые зависят от колебания технологических параметров в каждой паре клетей непрерывной группы $S_{o_{i-1}}$, S_{o_i} , μ_{o_i} . По аналогии с выражениями (3)–(5) можно записать формулу для расчета ширины раската на выходе из каждой пары клетей:

$$b_i = b_{o_i} - K_{b_i} \sigma, \quad (12)$$

где b_{o_i} – ширина полосы при свободной прокатке; K_{b_i} – технологический коэффициент влияния заднего натяжения на ширину полосы, выходящей из выделенной пары клетей.

Из формулы (11) видно, что для определения межклетьевого натяжения необходимо иметь технологические коэффициенты по натяжению $K_{s_{i-1}}$, K_{s_i} и K_{μ_i} , а также значения параметров опережения и вытяжки при нулевом натяжении, т. е. в условиях свободной прокатки. Для сортовой прокатки такие параметры целесообразно получать экспериментально, что на непрерывном стане затруднительно. Фактически это сводится к получению зависимостей типа (3)–(5) в условиях конкретного стана и конкретной калибровки валков, при этом требуется экспериментальное измерение продольных межклетьевых усилий, размеров сечения раската, опережения и вытяжки, что в условиях действующего стана затруднительно и связано с потерей производства.

Поэтому для расчета натяжений между клетями черновой группы стана 320 были использованы экспериментальные данные, полученные на других непрерывных сортовых станах, имеющие подобную калибровку валков, режимы обжатий и скорость прокатки [8–12]. Опережение при свободной прокатке рассчитывали по формуле Дрездена с учетом ширины полосы [13], а коэффициент вытяжки принимали по таблице калибровки. Технологические коэффициенты по опережению и вытяжке приняты по экспериментальным данным, полученным А. П. Чекмаревым и В. П. Гречко [10] на мелкосортном стане предприятия «АрселорМиттал Кривой Рог».

Расчеты выполнены по уравнению (8) для черновой группы стана 320 БМЗ при прокатке арматурного профиля № 10 способом МПР на пять ниток по заводской таблице калибровки.

В таблице приведены расчетные значения межклетьевых напряжений в черновой группе стана 320 РУП «БМЗ».

Номер межклетьевого промежутка	1	2	3	4	5	6	7
Межклетьевое напряжение, Н/мм ²	-22,1	-0,7	+4,3	+6,9	-12,4	-31,5	-7,3

Примечание. Плюс – натяжение; минус – подпор.

Согласно расчетным данным, при прокатке в черновой группе стана 320 имеется большая неравномерность в распределении межклетьевых напряжений – от натяжения величиной 6,9 Н/мм² до подпора величиной 31,5 Н/мм². В большинстве межклетьевых промежутков прокатка происходит с подпором, который может достигать значительной величины. Наибольшая величина подпора имеет место в первом и предпоследнем промежутках, достигая соответственно 22,1 и 31,5 Н/мм². Учитывая возможные изменения в процессе работы стана параметров прокатки (температуры, диаметров валков, регулировку межвалковых зазоров и др.), значения этих напряжений могут достигать величины предела текучести металла. В третьем и четвертом межклетьевых промежутках прокатка происходит с натяжением, а во втором промежутке наблюдается практически согласованный режим прокатки ($\sigma_{2-3} = -0,7$ Н/мм²).

Влияние усилий подпора и натяжения на энергосиловые и деформационные параметры непрерывной прокатки описано многими авторами, проведено большое количество экспериментальных исследований (работы А. И. Целикова, А. П. Чекмарева, В. Н. Выдрина и др.). Передний подпор (клетки № 1 и 6 стана 320) приводит к некоторому возрастанию давления прокатки и в большей мере – к увеличению момента. Задний подпор и переднее натяжение уменьшают момент прокатки как вследствие смещения равнодействующей сил в очаге деформации к плоскости входа металла в валки и ее наклона, приводящего к уменьшению плеча момента. При заднем натяжении или переднем подпоре точка равнодействующей смещается в направлении прокатки, увеличивается плечо равнодействующей, поэтому, несмотря на уменьшение давления прокатки, в результате заднего натяжения момент прокатки возрастает. Задний подпор в клетях № 2 и 7 черновой группы снижает момент прокатки. В клетки № 5 прокатка происходит с передним подпором и задним натяжением, что увеличивает момент прокатки.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что прокатка в черновой группе стана 320 РУП «БМЗ» происходит с большой неравномерностью продольных напряжений в раскате, имеются напряжения подпора и натяжения. Неравномерность продольных межклетьевых усилий приводит к неравномерной загрузке клетей черновой группы стана. Поэтому целесообразно установить на стане цифровую систему автоматического управления электроприводами клетей и скоростным режимом прокатки, обеспечивающую прокатку с минимальными продольными напряжениями, что по-

зволит повысить надежность и точность управления, т. е. обеспечить работу в согласованном режиме. В этом случае неравномерность нагрузок в клетях группы будет определяться только условиями деформации в овальных и круглых калибрах.

Выводы

1. В настоящее время стан 320 РУП «БМЗ» производит в основном только арматурный прокат периодического профиля: № 32–22 – в одну нитку; № 20 и 18 – МПР в две нитки; № 16, 14 – МПР в три нитки; № 12 – МПР в четыре нитки и № 10 – МПР в пять ниток, исключение составляет незначительный объем производства горячекатаных кругов диаметрами 19, 21, 28 мм. Уровень технических решений современного прокатного производства и износ значительной части оборудования требуют модернизации стана, что позволит заводу и впредь производить продукцию высокого качества, соответствующую требованиям рынка металлопроката.

2. В Институте черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины разработано программное средство, позволяющее моделировать процесс прокатки сортовых профилей с учетом влияния межклетевых сил в условиях непрерывных мелкокоротных станов.

Отличительной особенностью разработанного программного средства, описывающего процесс непрерывной сортовой прокатки, является более строгий учет параметра, в значительной степени определяющего изменение напряжения текучести металла в клетях стана и в его межклетевых промежутках, – температурного поля раската по длине стана.

3. Проверка адекватности математической модели выполнена путем сравнения расчетных и экспериментальных данных о параметрах прокатки арматурных профилей предпочтительного сортамента (№ 10, 12, 14, 16, 20) в условиях мелкокоротного стана 320 РУП «БМЗ».

Анализ результатов расчетов, выполненных с использованием разработанной математической модели, и сравнение их с практическими данными показали, что разработанная математическая модель достаточно точно и качественно верно описывает параметры процесса прокатки сортовых профилей в условиях непрерывного мелкокоротного стана 320 РУП «БМЗ». Погрешность результатов расчета составляет 8–12%.

4. Прокатка в черновой группе стана 320 РУП «БМЗ» происходит с большой неравномерностью продольных напряжений в раскате, имеются напряжения подпора и натяжения. Неравномерность продольных межклетевых усилий приводит к неравномерной загрузке клеток черновой группы стана. Поэтому целесообразно установить на стане цифровую систему автоматического управления электроприводами клеток и скоростным режимом прокатки, обеспечивающую прокатку с минимальными продольными напряжениями, что позволит повысить надежность и точность управления, т. е. обеспечить работу в согласованном режиме. В этом случае неравномерность нагрузок в клетях группы будет определяться только условиями деформации в овальных и круглых калибрах. При этом повысится также точность раската на выходе из черновой группы стана.

Литература

1. Совершенствование калибровок валков и оценка загрузки линий главных приводов на непрерывном мелкокоротно-проволочном стане 320/150 БМЗ / С. М. Жучков, Е. Я. Подковырин, В. А. Токмаков и др. // Ин-т «Черметинформация». М., 1991. (Обзорная информация. Сер. Прокатное производство). Вып. 3.
2. Целиков А. И., Зюзин В. И. Теория прокатки: Справ. М.: Металлургия, 1982.
3. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справ. М.: Металлургия, 1982.
4. Автоматизированный расчет технологических параметров прокатки на непрерывном сортовом стане / С. М. Жучков, Л. В. Кулаков, К. Ю. Ключников, А. П. Иванов // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2003. № 6. С. 40–44.
5. Особенности математической модели и программы расчета параметров непрерывной сортовой прокатки / С. М. Жучков, Л. В. Кулаков, К. Ю. Ключников, А. П. Иванов // Литье и металлургия. 2003. № 3. С. 157–164.
6. Совершенствование калибровки валков для прокатки круглых и арматурных профилей / В. Н. Асанов, А. Б. Стеблов, О. Н. Тулупов и др. // Сталь. 2008. № 11. С. 90–91.
7. Иводитов А. Н., Горбанев А. А. Разработка и освоение технологии производства высококачественной катанки. М.: Металлургия, 1989.
8. Чекмарев А. П., Левченко Л. Н. // Обработка металлов давлением. М.: Металлургиздат, 1962. Т. LVIII.
9. Чекмарев А. П. и др. // Прокатное производство. М.: Металлургия, 1965. Т. XXI. С. 237.
10. Чекмарев А. П., Гречко В. П. // Прокатное производство. Киев: Изд-во АН УССР. 1961. Т. XV. С. 137.
11. Мутьев М. С. и др. // Обработка металлов давлением. Металлургия, 1965. Т. XIX, С. 73.
12. Чекмарев А. П., Топоровский М. П. // Прокатное производство. Киев: Изд-во АН УССР. 1962. Т. XVII. С. 3.
13. Спиридонов Н. П., Куцыгин М. Д. // Прокатное производство. М.: Металлургия, 1969. Т. 29. С. 83–89.