

6
А-61
Ов

МИНИСТЕРСТВО ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ СССР
ИНСТИТУТ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

На правах рукописи

инж. Р. В. БЕДИНЕИШВИЛИ

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ПРОЦЕССА
НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ
ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

(05.324 — Обработка металлов давлением)

Автореферат

диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

+

Дне.

ДНЕПРОПЕТРОВСК — 1971

МИНИСТЕРСТВО ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ СССР
ИНСТИТУТ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

На правах рукописи

инж. Р. В. БЕДИНЕИШВИЛИ

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ПРОЦЕССА
НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ
ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

(05.324 — Обработка металлов давлением)

Автореферат

диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК — 1971



ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение растущих потребностей народного хозяйства СССР в прокатной продукции происходит не только за счет создания новых баз черной металлургии, но и освоением и внедрением новых высокопроизводительных технологических процессов и агрегатов прокатки на существующих заводах, а также широкой автоматизацией и механизацией производства.

В настоящее время одним из наиболее важных ресурсов увеличения производительности прокатных станов является повышение степени непрерывности процессов прокатки. Известно, что производительность современных непрерывных станов в полтора-два раза выше производительности станов с линейным и полунепрерывным расположением клетей.

Большие возможности откроются при введении процесса бесконечной прокатки, когда конец каждой прокатываемой заготовки сваривается с началом последующей. Теоретические и экспериментальные исследования в области технологии бесконечной прокатки, проведенные в Институте черной металлургии МЧМ СССР свидетельствуют о реальной возможности широкого применения новой схемы прокатки на непрерывных сортовых станах.

В общем балансе производства труб в СССР 40—50% составляют бесшовные трубы, изготавливаемые из катанных заготовок. Поэтому в последние годы большое внимание уделяется широкому внедрению в производство непрерывной прокатки трубных заготовок. За последнее десятилетие как зарубежом, так и в СССР были введены в эксплуатацию мощные непрерывно-заготовочные станы, способные производить непрерывным способом трубную заготовку диаметром до 250—300 мм.

Освоение непрерывного процесса прокатки крупных профилей выдвигает необходимость создания более совершенной теории данного процесса. Непрерывная прокатка на крупно-

сортных станах имеет ряд особенностей, отличающих ее от непрерывной прокатки на мелкосортных станах. Если при мелкосортной непрерывной прокатке допустима некоторая петля заготовки между клетями, то при непрерывной прокатке крупных сечений петля, обычно, приводит к авариям. Кроме этого, удельные межклетевые натяжения при мелкосортной прокатке (когда $\frac{l}{h} > 1$) меньше влияют на искажение профиля, чем такие же удельные натяжения при непрерывной прокатке крупносортовых профилей (когда $\frac{l}{h} < 1$).

Опыты показали, что в последнем случае малые приращения скоростей валков и, следовательно, межклетевого заднего натяжения приводят к значительным утяжкам горизонтальных размеров заготовок. Поэтому изучение процесса непрерывной прокатки высоких полос (когда $\frac{l}{h} < 1$) имеет несомненный научный и практический интерес, особенно, если учесть, что литературные данные по этому вопросу весьма скудны.

Для дальнейшего широкого внедрения непрерывной прокатки крупных сечений, проектирования новых непрерывных заготовочных станов и усовершенствования технологического процесса непрерывной прокатки на существующих станах необходимы данные по силовым воздействиям, деформированному и напряженному состоянию металла и скоростному режиму прокатки.

С целью устранения утяжки профиля необходимо регулирование рассогласования скоростного режима валков в зависимости от величины межклетевого натяжения, т. е. необходима математическая взаимосвязь между натяжением и отношением скоростей валков с учетом действующих технологических параметров прокатки, как в переходных, так и стационарных режимах.

Однако, ручное регулирование скоростей при непрерывной прокатке трубных заготовок малоэффективно, так как оператор не успевает исправлять возникающие колебания в натяжении. Кроме того, на непрерывной группе трубозаготовочного стана режим скоростей валков в переходных процессах прокатки является переменным. Для сохранения от-

ношения скоростей валков определенной величины необходимо опережающее управление двигателями непрерывной группы клетей.

Следовательно, повышение точности размеров трубной заготовки и снижение допусков возможно только лишь при точном автоматическом регулировании рассогласования скоростного режима валков в зависимости от межклетевого натяжения.

Создание достаточно надежной системы автоматического регулирования процесса непрерывной прокатки заготовочных станов связано с глубоким и всесторонним изучением закономерностей этого процесса.

Для успешного применения на непрерывных заготовочных станах современных средств автоматизации необходимо получить количественные связи между технологическими параметрами и падением скорости электропривода.

Настоящая работа проведена с целью исследования и освоения процесса прокатки непрерывным способом трубных заготовок в смежных клетях 750—2 и 750—3 трубозаготовочного стана 900/750×3 Руставского металлургического завода. Экспериментальная часть работы полностью выполнена в заводских условиях на стане 900/750×3. Промышленному опробованию и освоению подвергались трубные заготовки диаметрами 120 и 150 мм.

В предлагаемой работе разработан метод расчета давления металла на валки и межклетевого натяжения при непрерывной прокатке крупносортовых профилей с применением к частной задаче прокатки трубных заготовок на непрерывной группе клетей трубозаготовочного стана 900/750×3; получены расчетные формулы рассогласования скоростного режима валков и положения нейтрального сечения в зависимости от межклетевого натяжения и технологических параметров; теоретически и экспериментально установлены оптимальное соотношение скоростей валков непрерывной группы трубозаготовочного стана 900/750×3 и условие утяжки профиля заготовки; предложены высокопроизводительные схемы прокатки трубных заготовок и ряд практических рекомендаций, реализация которых даст заводу экономию в 500 тыс. рублей в год.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ГРУППЫ КЛЕТЕЙ ТРУБОЗАГОТОВОЧНОГО СТАНА 900/750×3

Непрерывная группа стана 900/750×3 Руставского металлургического завода состоит из двух клеток: 750—2 с вертикальными валками и 750—3 с горизонтальными валками.

Во время освоения непрерывного процесса прокатки трубных заготовок на стане 900/750×3 было проведено комплексное экспериментальное исследование силовых параметров прокатки, скоростного режима и деформированного состояния металла (искажение профиля от натяжений).

Из энергосиловых параметров опытным замерам подвергались давления металла на валки в клетях 750—2 и 750—3, крутящий момент на главном валу двигателя клетки 750—2, межклетевое натяжение, ток и напряжения в главных приводах клеток. Давления металла на валки измерялись с помощью магнитоупругих мессдоз, расположенных под каждым нажимным винтом обеих клеток, а крутящий момент — с помощью тензометрических датчиков наклеенных на главном валу привода стана. Осциллограммы изменения тока и напряжения снимали со шунтов и щеток якоря двигателя. Межклетевое натяжение фиксировали четырьмя магнитоупругими мессдозами, помещенными между рамой и станиной вертикальной клетки 750—2.

Исследование скоростного режима прокатки заключалось в записи величин чисел оборотов валков клеток 750—2 и 750—3 с помощью схемы сравнения напряжений тахогенераторов и батарей.

Изучение влияния рассогласования скоростного режима прокатки на геометрию трубной заготовки в чистовой клетке производилось измерением в холодном состоянии вырезанных темплетов с середины (при наличии продольного усилия) и с конца (когда продольное усилие отсутствует) прокатываемой полосы.

Все исследуемые параметры прокатки (кроме изучения геометрии заготовки) записывались на фотобумаге шириной 120 мм с помощью осциллографа Н—700.

Для изучения влияния межклетевых натяжений на процесс прокатки в клетке 750—3 посредством схемы управления двигателями увеличивали скорость прокатки и таким обра-

зом создавали рассогласованный скоростной режим и межклетевое натяжение.

Опыты проводились в четыре серии при производстве трубных заготовок диаметрами 120 и 150 мм при различных технологических параметрах. Соотношение длины дуги захвата к средней толщине полосы изменялось от 0,36 до 0,74, угол захвата — от 0,169 до 0,236 рад. Всего было прокатано свыше ста опытных заготовок.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

Для разработки метода расчета давления металла на валки при непрерывной прокатке крупносортовых профилей в калибрах, в первую очередь, требуется решение задачи по непрерывной прокатке высоких полос на гладкой бочке.

Как известно, при допущении, что деформация — плоская, имеются два дифференциальных уравнения равновесия и условие пластичности следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} &= 0 \\ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 &= 4k^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

При решении системы уравнений (1) был использован метод разработанный В. С. Смирновым, для случая свободной прокатки с учетом влияния внешних зон.

Решение уравнений равновесия и условия пластичности с учетом приложенных к концам полосы заднего и переднего натяжений дает следующие функции напряжений:

$$\frac{\tau_{xy}}{2k} = \frac{0,425 \operatorname{sh} \frac{2y}{h}}{\operatorname{sh} \frac{l}{h}} \left[\operatorname{sh} \frac{2x-l}{y} + \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4k} \frac{\operatorname{sh} \frac{2(x-l)}{h}}{\operatorname{sh} \frac{l}{h}} \right]; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_y}{2k} &= -\frac{0,425 \operatorname{ch} \frac{2y}{h}}{\operatorname{sh} \frac{l}{h}} \left[\operatorname{ch} \frac{2x-l}{h} + \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4k} \frac{\operatorname{ch} \frac{2(x-l)}{h}}{\operatorname{sh} \frac{l}{h}} \right] + \\ &+ 0,5 \operatorname{cth} \frac{l}{h} + \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4k} \operatorname{cth}^2 \frac{l}{h} + \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{4k} - 1; \\ \frac{\sigma_x}{2k} &= -\frac{0,425 \operatorname{ch} \frac{2y}{h}}{\operatorname{sh} \frac{l}{h}} \left[\operatorname{ch} \frac{2x-l}{h} + \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4k} \frac{\operatorname{ch} \frac{2(x-l)}{h}}{\operatorname{sh} \frac{l}{h}} \right] + \\ &+ 0,5 \operatorname{cth} \frac{l}{h} + \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4k} \operatorname{cth}^2 \frac{l}{h} + \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{4k}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ — нормальные и касательные напряжения;
 l — длина геометрического очага деформации;
 h — средняя высота очага деформации;
 σ_0, σ_1 — удельное заднее и переднее натяжения;
 $2k$ — сопротивление металла пластическому деформированию.

При свободной прокатке, когда отсутствуют натяжения ($\sigma_0 = \sigma_1 = 0$), из уравнений (2) получаются функции напряжений, ранее предложенные В. С. Смирновым, А. Д. Карачунским, А. К. Григорьевым.

Уравнения (2) позволяют рассчитывать нормальные и касательные напряжения в различных сечениях геометрического очага деформации, как при свободной прокатке, так и при прокатке с натяжением.

Общее выражение для определения среднего удельного давления имеет вид:

$$p_{cp} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_y dy. \quad (3)$$

Подставив выражение для σ_y из уравнения (2) в выражение (3), после интегрирования с учетом $y = \frac{h}{2}$ получим:

$$n_\sigma = \frac{p_{cp}}{2k} = 1 + 0,656 \frac{h}{l} - 0,5 \operatorname{cth} \frac{l}{h} - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4k} \operatorname{cth} \frac{l}{h} \left(\operatorname{cth} \frac{l}{h} - 0,656 \frac{h}{l} \right) - \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{4k}. \quad (4)$$

Окончательная формула для расчета коэффициента напряженного состояния при непрерывной прокатке высоких полос (когда $\frac{l}{h} < 1$) на гладкой бочке после аппроксимации принимает следующий вид:

$$n_\sigma = \left[1 + 0,155 \left(\frac{h}{l} - \frac{l}{h} \right) \right] - 0,44 \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4k} \times \\ \times \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{l}{h} \right)^2 + 3 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right] \right\} - \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{4k}. \quad (5)$$

Выражение (5) можно представить как разность коэффициента напряженного состояния при свободной прокатке —

$$n_{\sigma_0} = 1 + 0,155 \left(\frac{h}{l} - \frac{l}{h} \right),$$

(полученного В. С. Смирновым, А. Д. Карачунским, А. К. Григорьевым) и коэффициента снижения давления от натяжений —

$$n_{\sigma_{II}} = 0,44 \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4k} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{l}{h} \right)^2 + 3 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right] \right\} + \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{4k}.$$

Рассмотрение выражения (5) показывает, что (как и следовало ожидать) наличие натяжений снижает давление металла на валки; характер этого влияния при постоянных значениях $\frac{l}{h}$ является прямолинейным. При этом во всем диапазоне изменения отношения длины дуги захвата к средней толщине полосы ($0,1 < \frac{l}{h} < 1$) эффект заднего натяжения на снижение давления больше, чем переднего натяжения.

Степень влияния натяжений на уменьшение коэффициента напряженного состояния зависит от величины фактора

формы очага деформации — $\frac{l}{h}$. С уменьшением $\frac{l}{h}$ натяжения резко снижают давление. Зависимость коэффициента напряженного состояния от $\frac{l}{h}$ при постоянных значениях переднего и заднего натяжений является криволинейной.

В работе найдено выражение для расчета среднедействующего коэффициента напряженного состояния при прокатке трубных заготовок, когда в круглый калибр с радиусом r поступает многоугольная полоса с закругленными углами, которая по форме близка к эллиптическому профилю. Для системы калибров эллипс — круг имеем:

$$n_{\sigma_k} = \frac{\int_0^r n_{\sigma} l dy}{\int_0^r l dy} \quad (6)$$

В выражение (6) подставляется значение n_{σ} по формуле (5). Параметры входящие в (5) для случая прокатки в калибрах не являются постоянными по ширине калибра. После подстановки текущих геометрических параметров очага деформации и интегрирования получена расчетная формула среднедействующего коэффициента напряженного состояния при прокатке трубных заготовок с натяжениями:

$$n_{\sigma_k} = 1 + 0,17 \left(0,785 \frac{H}{L} - \frac{L}{H} \right) - 0,44 \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4k} \times \\ \times \left[1 + 0,3 \left(\frac{L}{H} \right)^2 + 0,6 \left(\frac{H}{L} \right)^2 \right] - \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{4k}, \quad (7)$$

где $\frac{L}{H}$ — соотношение длины дуги захвата к средней толщине полосы на дне калибра.

Проведенное экспериментальное исследование изменения давлений металла на валки от приложенного заднего и переднего натяжений на непрерывной группе стана 900/750×3

РМЗ при освоении процесса непрерывной прокатки трубных заготовок диаметрами 120 и 150 мм показало пригодность предложенного метода расчета коэффициента напряженного состояния.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССОГЛАСОВАНИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ВАЛКОВ И МЕЖКЛЕТЕВЫХ УСИЛИЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

Схема прокатки принимается плоской. Такое допущение правомерно, так как при прокатке полосы в круглых и десятиугольных калибрах уширение незначительно.

Уравнение равновесия моментов для одного вала, когда приложены заднее и переднее натяжения, может быть записано следующим образом:

$$M_b + M_1 = M_{пр} + M_0, \quad (8)$$

где M_b — крутящий момент на бочке вала;

M_1 — момент от переднего натяжения;

$M_{пр}$ — момент прокатки (момент технологического сопротивления с учетом изменения контактных напряжений от натяжений);

M_0 — момент от заднего натяжения.

Значения отдельных составляющих уравнения моментов для элементарного продольно-вертикального слоя металла с шириной dy имеют вид:

$$M_b = \tau_c R l dy = \tau_c \alpha R^2 dy;$$

$$M_1 = \frac{1}{2} \sigma_1 h_1 R dy;$$

$$M_{пр} = P \psi l = p_{ср} \psi \alpha^2 R^2 dy;$$

$$M_0 = \frac{1}{2} \sigma_0 h_0 R dy;$$

где τ_c — усредненное значение удельной силы трения по дуге захвата произвольного элементарного слоя;

R — катающий радиус, соответствующий произвольному элементарному слою металла;

l — длина дуги захвата того же слоя;

σ_0, σ_1 — удельное заднее и переднее натяжения;
 h_0, h_1 — высота произвольного продольно-вертикального слоя полосы при входе и выходе заготовки;
 α — угол захвата того же слоя;
 P, p_{cp} — полное и среднее удельное давление того же слоя металла на валок с учетом натяжений;
 ϕ — коэффициент плеча равнодействующей того же слоя с учетом натяжений.

Подставляя значения соответствующих моментов в уравнение (8) и решая его относительно удельной силы трения, получим:

$$\tau_c = 2kn_\sigma\alpha\phi + \frac{\sigma_0 h_0 - \sigma_1 h_1}{2l} = 2kn_\sigma\alpha\phi + \frac{h_1}{2l}(\sigma_0\lambda - \sigma_1), \quad (9)$$

где λ — вытяжка полосы.

Более точное выражение для определения усредненного значения касательных сил трения можно получить из закона сохранения энергии.

$$N_b = N_{np} + N_0 - N_1.$$

После подстановки значений мощностей на бочке вала — N_b , прокатки — N_{np} и разности от переднего и заднего натяжений $N_0 - N_1$ получим:

$$\tau_c = 2kn_\sigma\alpha\phi + \frac{h_1}{2l}(\sigma_0 - \sigma_1)(1 + S), \quad (9')$$

где S — опережение.

Если допустить закон распределения удельных сил трения по дуге захвата линейным, то усредненное значение удельной силы трения по длине контакта элементарного слоя металла с валками определится из следующего выражения:

$$\tau_c = \frac{1}{2} \frac{k(l - l_n) - k'l_n}{l}, \quad (10)$$

где l_n — расстояние от оси валков до нейтрального сечения;
 k' — сопротивление металла пластическому сдвигу при выходе металла из валков.

Приравнивая правые части уравнений (9) и (10) и решая его относительно $\frac{l_n}{l}$ после алгебраических преобразований получим:

$$\frac{l_n}{l} = \frac{\gamma}{\alpha} = \frac{1}{2} \frac{1 - 4n_\sigma\alpha\phi - \frac{\sigma_0 h_0 - \sigma_1 h_1}{kl}}{1 - 2n_\sigma\alpha\phi - \frac{\sigma_0 h_0 - \sigma_1 h_1}{2kl}}. \quad (11)$$

Более точное выражение, исходя из энергетического принципа, имеет вид:

$$\frac{l_n}{l} = \frac{\gamma}{\alpha} = \frac{1}{2} \frac{1 - 4n_\sigma\alpha\phi - \frac{h_1}{kl}(\sigma_0 - \sigma_1)(1 + S)}{1 - 2n_\sigma\alpha\phi - \frac{h_1}{2kl}(\sigma_0 - \sigma_1)(1 + S)}. \quad (11')$$

Уравнения (11) и (11') являются расчетными формулами для определения положения нейтрального сечения с учетом технологических параметров и натяжений. Эти формулы показывают, что при равенстве полных и удельных натяжений положение нейтрального сечения меняется только лишь за счет изменения напряженного состояния металла — n_σ от натяжений.

Имея формулу для нахождения положения нейтрального сечения исследуем скоростной режим смежных клеток при непрерывной прокатке.

При прокатке на гладкой бочке из условия постоянства секундных объемов с допущением, что $\cos \gamma_i = \cos \gamma_{i+1}$ имеем:

$$v_i y_{n_i} \cdot b_{n_i} = v_{i+1} y_{n_{i+1}} b_{n_{i+1}}, \quad (12)$$

где $y_{n_i}, y_{n_{i+1}}$ — высота полосы в нейтральных сечениях в i -той и $i+1$ клетях:

$b_{n_i}, b_{n_{i+1}}$ — ширина полосы в нейтральных сечениях в i -той и $i+1$ клетях:

v_i, v_{i+1} — окружная скорость валков в i -той и $i+1$ клетях.

Определяя для i -той и $i+1$ клеток окружную скорость валков и высоту и ширину полосы в нейтральных сечениях, принимая линейный закон распределения уширения в очаге деформации, после подстановки их значений в уравнение (12) получим следующее выражение:

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{R_i}{R_{i+1}} \frac{h_{1i}}{h_{1i+1}} \frac{b_{0i}}{b_{0i+1}} \times \frac{\left(1 + \varepsilon_{\eta i} \frac{l_{\eta i}}{l_i}\right) \left[1 + \varepsilon_{b i} \left(1 - \frac{l_{\eta i}}{l_i}\right)\right]}{\left(1 + \varepsilon_{h i+1} \frac{l_{\eta i+1}}{l_{i+1}}\right) \left[1 + \varepsilon_{b i+1} \left(1 - \frac{l_{\eta i+1}}{l_{i+1}}\right)\right]} \quad (13)$$

где n_i, n_{i+1} — число оборотов в минуту соответствующих валков;

R_i, R_{i+1} — катающий радиус соответственной клетки;

h_{1i}, h_{1i+1} — высота элементарного слоя металла после пропуска в i -той и $i+1$ клетях;

b_{0i}, b_{0i+1} — ширина полосы до прокатки.

Полученная расчетная формула для определения отношения скоростей валков выведены с учетом наличия положительного опережения.

При прокатке высоких полос с большими натяжениями наблюдается так называемое отрицательное опережение, при котором мнимое нейтральное сечение находится за осью валков и прокатка осуществляется с полным отставанием. Подобное явление экспериментально доказано во многих работах.

В связи с этим представляет определенный практический интерес найти зависимость отношения скоростей валков от технологических параметров при отрицательном опережении.

С учетом наличия мнимого нейтрального сечения за осью валков формула (13) принимает вид:

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{R_i}{R_{i+1}} \frac{h_{1i}}{h_{1i+1}} \frac{b_{0i}}{b_{0i+1}} \times \frac{\left(1 + \varepsilon_{\eta i} \frac{l_{\eta i}}{l_i}\right) \left[1 + \varepsilon_{b i} \left(1 - \frac{l_{\eta i}}{l_i}\right)\right]}{\left(1 - \frac{\varepsilon_{h i+1}}{1 + \frac{l_{\eta i+1}}{l_{i+1}}}\right) \left[1 + \varepsilon_{b i+1} \left(1 + \frac{l_{\eta i+1}}{l_{i+1}}\right)\right]} \quad (13')$$

Из уравнения (13) и (13'), при заданных величинах отношения скоростей валков и технологических параметров прокатки, можно определить межклетовое натяжение.

Вышеприведенные формулы содержат текущие геометрические и силовые параметры произвольного продольно-вертикального сечения полосы.

При производстве трубных заготовок в чистовой клетке 750—3 в круглом калибре подается неправильная многоугольная полоса с закругленными углами, которую без больших погрешностей можно заменить эллиптическим профилем. При этом текущие значения геометрических параметров очага деформации выражаются следующими известными в литературе соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} l_3 &= L_3 \sqrt[4]{1 - \frac{y^2}{r^2}}; & \Delta h_3 &= \Delta H_3 \sqrt{1 - \frac{y^2}{r^2}}; \\ h_{03} &= H_{03} \sqrt{1 - \frac{y^2}{r^2}}; & R_3 &= R_{\Delta 3} + r \left(1 - \sqrt{1 - \frac{y^2}{r^2}}\right); \\ h_{13} &= H_{13} \sqrt{1 - \frac{y^2}{r^2}}; & h_{\text{ср.3}} &= H_{\text{ср.3}} \sqrt{1 - \frac{y^2}{r^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где l_3 — длина геометрического очага деформации произвольного продольно-вертикального сечения полосы;

L_3 — длина геометрического очага деформации в центре калибра;

r — радиус калибра;

h_{03}, h_{13} — высота полосы при входе и выходе в произвольном продольно-вертикальном сечении;

Δh_3 — обжатие того же сечения;

H_{03}, H_{13} — высота полосы при входе и выходе из валков в центре калибра;

ΔH_3 — обжатие на дне калибра;

R_3 — катающий радиус произвольного продольно-вертикального сечения;

$R_{\Delta 3}$ — радиус валка на дне калибра;

$h_{\text{ср.3}}$ — средняя высота произвольного продольно-вертикального сечения полосы;

$H_{\text{ср.3}}$ — средняя высота полосы в центре калибра.

Расчет среднедействующей величины коэффициента напряженного состояния — n_{σ_3} производится по формуле (7).

Среднедействующие значения катающего радиуса — $R_{\text{ср.з}}$, угла захвата — $\alpha_{\text{ср.з}}$ и коэффициента плеча равнодействующей сил находятся по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{ср.з}} &= \frac{\int_0^r R_3 l_3 dy}{\int_0^r l_3 dy} \approx R_{\text{д.з}} + 0,115 r; \\ \alpha_{\text{ср.з}} &= \frac{\int_0^r \alpha_3 l_3 dy}{\int_0^r l_3 dy} \approx 0,86 \frac{\Delta H_3}{L_3}; \\ \psi_{\text{ср.з}} &= \frac{\int_0^r \psi_3 l_3 dy}{\int_0^r l_3 dy} = 0,79 - 0,957 \frac{L_3}{H_{\text{ср.з}}} + 0,533 \frac{L_3^2}{H_{\text{ср.з}}^2}. \end{aligned} \right\} (15)$$

Относительная степень деформации по высоте — ε_{h_3} при прокатке эллиптической полосы в круглом калибре не зависит от поперечной координаты и равна

$$\varepsilon_{h_3} = \frac{\Delta h_3}{h_{13}} = \frac{\Delta H_3}{2r}. \quad (16)$$

Степень деформации по ширине —

$$\varepsilon_{b_3} = \frac{\Delta b_3}{b_{03}}. \quad (17)$$

В клетки 750—2 непрерывной группы трубозаготовочного стана 900/750×3 в многоугольном калибре подается многоугольная полоса, поперечное сечение которой заменена эллиптическим профилем.

При этом текущие параметры очага деформации выражаются следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} l_2 &= L_2 \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{b_{12}}\right)^2}; \\ h_{02} &= H_{02} \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{r + \frac{\Delta h_3}{2}}\right)^2}; \\ h_{12} &= 2r - \Delta b_3 \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{r + \frac{\Delta h_3}{2}}\right)^2}; \\ \Delta h_2 &= \Delta H_2 \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{r + \frac{\Delta h_3}{2}}\right)^2}; \\ R_2 &= R_{12} + \left(r - \frac{\Delta b_3}{2}\right) \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{r + \frac{\Delta h_3}{2}}\right)^2}\right]. \end{aligned} \right\} (18)$$

Среднедействующие значения силовых и геометрических параметров по всей контактной поверхности определяются вышележающими методами; окончательные расчетные формулы имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{ср.2}} &\approx R_{\text{д.2}} + 0,115 \left(r - \frac{\Delta b_3}{2}\right); \\ \alpha_{\text{ср.2}} &\approx 0,86 \frac{\Delta H_2}{L_2}; \\ \psi_{\text{ср.2}} &= 0,79 - 0,957 \frac{L_2}{H_{\text{ср.2}}} + 0,533 \frac{L_2^2}{H_{\text{ср.2}}^2}; \\ \varepsilon_{h_2} &= \frac{\Delta H_2}{2r - \Delta b_3}; \quad \varepsilon_{b_2} = \frac{\Delta b_2}{b_{02}}. \end{aligned} \right\} (19)$$

Предложенный метод расчета рассогласования скоростного режима и межклетевых натяжений применялся при освоении процесса непрерывной прокатки трубных заготовок.

на трубозаготовочном стане 900/750×3 Руставского металлургического завода.

Экспериментальное исследование скоростного режима непрерывной прокатки трубных заготовок крупных сечений показало, что нарушение оптимального режима скоростей валков влечет за собой обязательную утяжку профиля с получением брака или появления усов и образования петли, после чего необходимо остановить прокатку до устранения изогнутой заготовки из клетей.

Отличительной особенностью непрерывной крупносортовой прокатки от непрерывной прокатки на мелкосортных станах является резкое повышение межклетевого натяжения от малого приращения соотношения скоростей валков. Таким образом, экспериментально доказана необходимость точного соблюдения согласования скоростного режима для получения качественной продукции при прокатке крупносортовых профилей.

Оптимальным режимом скоростей валков при прокатке крупных сортовых профилей является то соотношение скоростей валков, при котором обеспечивается минимальное натяжение. При этом горизонтальный размер профиля не выходит из поля допусков. Экспериментальным исследованием установлено, что оптимальным соотношением скоростей валков стана 900/750×3 при существующей заводской калибровке для трубной заготовки диаметром 120 мм является величина $\frac{n_3}{n_2} = 1,15 \div 1,16$, а для трубной заготовки диаметром 150 мм

$\frac{n_3}{n_2} = 1,18 \div 1,20$, что хорошо согласуется с расчетными данными.

Величина межклетевого натяжения при установившемся процессе прокатки колеблется незначительно. Можно предположить, что это колебание связано с неравномерным нагревом полосы по длине раската.

ВЛИЯНИЕ РАССОГЛАСОВАНИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ВАЛКОВ И МЕЖКЛЕТЕВОГО НАТЯЖЕНИЯ НА ГЕОМЕТРИЮ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

Межклетевые натяжения в общем случае изменяют условия формоизменения в очаге деформации (уменьшает уширение и т. д.). В частности, при прокатке высоких полос,

когда в центральных слоях полосы имеются продольные напряжения растяжения, межклетевые натяжения, суммируясь с продольными напряжениями растяжения, могут достигнуть такой величины, которая утянет профиль заготовки по всему сечению. Этим нужно объяснить экспериментально установленный факт, заключающийся в утяжке горизонтальных размеров профиля в очаге деформации натяжениями, величина которых намного меньше сопротивления пластическому деформированию.

Уравнение нормального продольного напряжения — σ_x (см. формулу (2)) дает возможность найти величину среднего растягивающего напряжения — σ_{cp} при достижении которой начинается утяжка профиля:

$$\frac{\sigma_{cp}}{2k} = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{\sigma_x}{2k} dx = \left(\operatorname{cth} \frac{l}{h} - 0,425 \frac{h}{l} \right) \left(1 + \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4k} \operatorname{cth} \frac{l}{h} \right) + \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{4k} - 0,5 \operatorname{cth} \frac{l}{h} = \frac{1}{2}. \quad (20)$$

Из этого уравнения предельного состояния, при заданном соотношении $\frac{l}{h}$, можно найти величины натяжений, превышение которых вызывает утяжку профиля.

Проведенными экспериментальными исследованиями по определению утяжки трубной заготовки в чистовой клети 750—3 установлен характер изменения горизонтальных и вертикальных размеров от заднего натяжения. Например, заднее натяжение $\sigma_{23} \approx 1,0 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$ утягивает горизонтальный диаметр от 120,6 мм до 113,6 мм, а вертикальный диаметр до 117,0 мм. Такое отклонение превышает допуск установленный стандартом.

Экспериментами был установлен скоростной режим и предельные натяжения, соблюдение которых обеспечивает получение профиля трубной заготовки правильной геометрии на непрерывной группе клетей стана 900/750×3.

На основании проведенного комплексного исследования непрерывной группы трубозаготовочного стана 900/750×3 Руставского металлургического завода предложены новые

высокопроизводительные схемы прокатки и соответствующий оптимальный режим скоростей валков при прокатке трубных заготовок диаметром от 100 до 230 мм на непрерывной группе клетей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Получены функции нормальных и касательных напряжений по всему объему металла при прокатке крупных сечений на гладкой бочке ($\frac{l}{h} \leq 1$) с учетом влияний внешних зон и приложенных к очагу деформации продольных усилий.
2. Предложены расчетные формулы коэффициента напряженного состояния для случая непрерывной прокатки крупных сечений на гладкой бочке и трубных заготовок в круглых калибрах в зависимости от $\frac{l}{h}$ с учетом влияния внешних зон и заднего и переднего удельных натяжений.
3. Теоретически и экспериментально показан эффект влияния натяжений на коэффициент напряженного состояния при различных отношениях $\frac{l}{h}$. Установлено, что степень влияния натяжений на изменений давления при малых отношениях $\frac{l}{h}$ значительно больше, с чем при отношениях $\frac{l}{h}$ близких к единице.
4. Проведено экспериментальное исследование энергосиловых параметров процесса прокатки в непрерывной группе клетей 750—2 и 750—3 трубозаготовочного стана 900/750×3 Руставского металлургического завода. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических результатов исследований подтвердил пригодность предложенного метода расчета силовых параметров процесса непрерывной прокатки трубных заготовок.
5. Экспериментально установлено одинаковое влияние межклетового натяжения на снижение и приращение крутящих моментов в смежных клетях непрерывной группы трубозаготовочного стана 900/750×3.
6. Предложена формула для расчета положения нейтрального сечения с учетом технологических параметров и

натяжений при непрерывной прокатке на гладкой бочке с приложением к частной задаче непрерывной прокатки трубных заготовок. Она пригодна также при наличии заднего натяжения, величина которого может вывести критическое сечение за ось валков.

7. Получены расчетные формулы рассогласования скоростного режима валков смежных клетей в зависимости от межклетового натяжения и технологических параметров при непрерывной прокатке на гладкой бочке и трубных заготовок, которые были использованы при освоении непрерывной группы клетей трубозаготовочного стана 900/750×3. Теоретически и экспериментально установлено оптимальное соотношение скоростей валков, обеспечивающее нулевое натяжение при непрерывной прокатке трубных заготовок.

8. Установлены величина и характер изменения межклетового натяжения в зависимости от рассогласования скоростей в переходных и стационарных режимах прокатки.

9. Изучено влияние межклетового натяжения на геометрию профиля в чистовой клети 750—3. Выведено уравнение предельного состояния утяжки профиля, что дает возможность определить величину межклетового натяжения, при которой горизонтальный диаметр не выходит из поля допусков.

10. Экспериментальным и расчетным путем установлено, что малое приращение отношения скоростей валков, и следовательно, межклетового натяжения, вызывает значительное уменьшение диаметра трубной заготовки по разьему валков. Обнаруженный эффект является следствием суммарного влияния внутренних растягивающих напряжений и приложенного заднего натяжения.

11. На основе проведенных исследований были предложены высокопроизводительные схемы прокатки, калибровка валков и оптимальный скоростной режим прокатки трубных заготовок диаметром от 100 до 230 мм.

12. Основные положения диссертационной работы были использованы при освоении процесса непрерывной прокатки трубных заготовок диаметром 120 и 150 мм на трубозаготовочном стане 900/750×3 Руставского металлургического завода. При полной загрузке непрерывной группы клетей производительность стана увеличивается на 25—30%, что дает годовой экономический эффект примерно 500 тыс. рублей в год.

Основные содержание диссертации
опубликовано в работах

1. А. Д. Нозадзе, Р. В. Бединейшвили, Метод расчета натяжения при прокатке трубной заготовки, Прокатное и трубопрокатное производство, сб. трудов Института металлургии АН ГССР, т. 17, вып. 1, 1969.
2. А. Д. Нозадзе, Р. В. Бединейшвили, Г. Ш. Хведелидзе, Исследование напряжений при прокатке крупносортовых профилей, Прокатное и трубопрокатное производство, сб. трудов Института металлургии АН ГССР, т. 17, вып. 1, 1969.
3. А. Д. Нозадзе, Р. В. Бединейшвили, Б. М. Заславский, Давление металла на валки при непрерывной прокатке трубных заготовок, Сообщения АН ГССР, т. 55, № 3, IX, 1969.
4. А. Д. Нозадзе, Р. В. Бединейшвили, Расчет натяжения при прокатке крупносортовых профилей, Сообщения АН ГССР, т. 57, № 3, III, 1970.
5. А. Д. Нозадзе, Р. В. Бединейшвили, Исследование продольных натяжений и утяжка профиля при непрерывной прокатке трубных заготовок, Сообщения АН ГССР, т. 59, № 1, VII, 1970.
6. А. Д. Нозадзе, Р. В. Бединейшвили, Исследование рассогласования скоростного режима валков при непрерывной прокатке трубных заготовок, Сообщения АН ГССР, т. 59, № 2, VIII, 1970.

Материалы диссертации доложены

1. На объединенном семинаре кафедры ОМД ДМЕТИ и прокатных отделов ИЧМ, январь, 1971.
2. На научной конференции, посвященной 50 летию Грузинской ССР и Компартии Грузии, февраль, 1971.

ინჟ. რომან ვასილის ძე ბედინეიშვილი

მილნაბადების უწყვეტი გლინვის პროცესის გამოკვლევა
და ათვისება

(05. 324 — ლითონთა წნევით დამუშავება)

(ავტორეფერატი)