

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (НИУ)

Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»
Кафедра «Машины и технологии обработки материалов давлением»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, степень, звание

/В.Г. Шеркунов, д.т.н., проф./

« 2 » июля, 2016 г.

Разработка технологии прокатки листов на современных станах
горячей прокатки

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ–150400.2016.120831875.ВКР

(номер специальности, год, номер студенческого билета)

Руководитель, должность

Соседкова М.А. / Соседкова М.А. /

« 6 » июля 2016 г.

Автор

студент группы МиМТ-484

Маннанов А.И. / Маннанов А.И. /

« 7 » июля 2016 г.

Челябинск 2016
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(национальный исследовательский университет)

Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»
Кафедра «Машины и технологии обработки материалов давлением»
Направление 150400 «Металлургия»

МиТОМД

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

Шеркунов В.Г.
«*В.Г. Шеркунов*» 2016 г

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу

Маннанову Айрату Ильдаровичу
(фамилия, имя, отчество написать полностью)

Группа: **МиМТ-484**

1. Тема работы: **«Разработка технологии прокатки листов на современных станах горячей прокатки»**

утверждена приказом по университету от ____ 2016 г. № _____

2. Срок сдачи студентом законченной работы: **1 июня 2016 г.**

3. Исходные данные к работе: **периодическая и учебная литература.**

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. **Литературный обзор состояния и развития листопрокатных станов в отечественной и мировой практике.**

2. **Анализ технологического процесса и оборудования стана 2000 горячей прокатки ОАО «ММК»**

3. **Расчет показателей формоизменения металла при производстве листа толщиной 4мм.**

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей, плакатов в листах формата А1):

АННОТАЦИЯ

Маннанов А.И. Разработка технологии прокатки листов на современных станах горячей прокатки. – Челябинск: ЮУрГУ, 2016. 30 – страниц, библиографический список – 12 наименований, 9 – иллюстрации, 7 – таблиц.

Цель выпускной квалификационной работы – познакомиться с современными тенденциями листопрокатной металлургии, понять насколько актуальна в данный момент производство тонколистового проката. Оценить реальные возможности стана 2000 ОАО «ММК», попытаться понять его слабые места, недоработки.

Произвести расчет показателей формоизменения металла при производстве листа толщиной 4 мм.

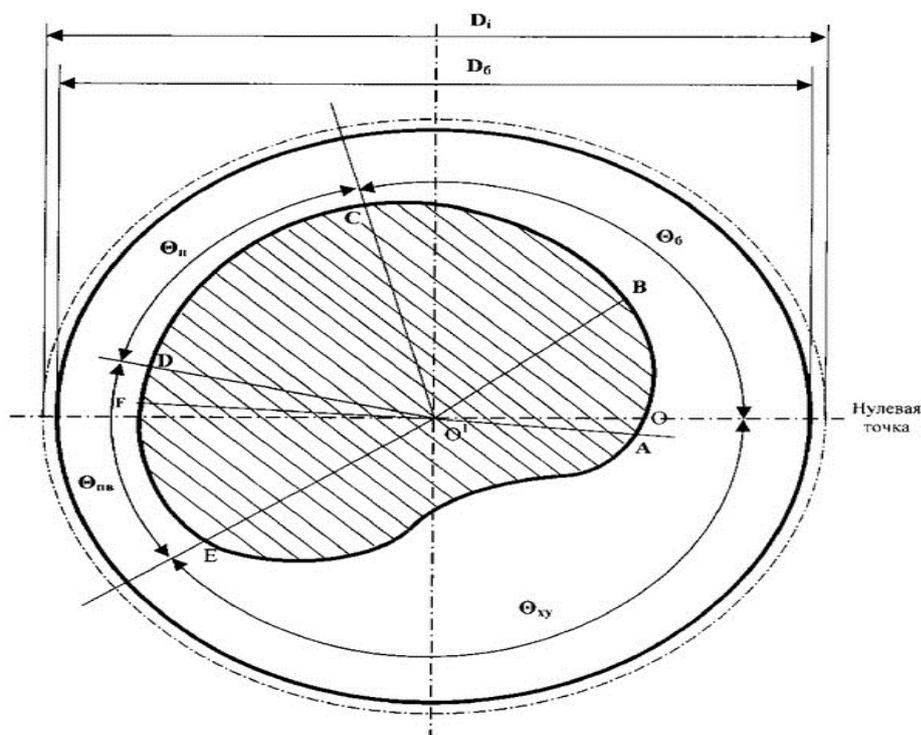
ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ И РАЗВИТИЯ ЛИСТОПРОКАТНЫХ СТАНОВ В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И МИРОВОЙ ПРАКТИКЕ	7
2. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ СТАНА 2000 ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ОАО «ММК»	14
3. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИСТА ТОЛЩИНОЙ 4ММ	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	32
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	33

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Методы проектирования режимов прокатки труб на пилгерстанах

В пилгеримовом стане происходит прокатка гильзы в трубу в прокатных валках, имеющих ручей с переменным радиусом. Ручей валка состоит из рабочей и холостой частей: в рабочей части ручья происходит прокатка гильзы в трубу, а в холостой части ручья производится подача гильзы в валки с одновременным поворотом её на 90° . Для определения частоты вращения валков, расчёта величины подачи, объёма имеются зависимости, определяющие процесс прокатки трубы в пилгеримовом стане, приведены ниже.



- $D_б$ – диаметр бочки валка;
- $D_и$ – идеальный диаметр валка;
- $\angle OO^1C$ - $\Theta_б$ – боёк
- $\angle CO^1D$ - $\Theta_п$ – полирующий участок
- $\angle DO^1E$ - $\Theta_{пв}$ – угол продольного выпуска
- $\angle EO^1O$ - $\Theta_{ху}$ – холостой участок
- $\angle AO^1B$ – участок бойка без механической обработки
- $\angle BO^1C$ – участок бойка с механической обработкой с чистой поверхностью
- $\angle CO^1F$ – полирующий и участок продольного выпуска с чистой поверхностью
- $\angle EO^1F$ – участок угла продольного выпуска с чистой обработкой
- $\angle FO^1A$ – холостой участок валка с литой поверхностью и равен

Рисунок 1 - Схема калибровки валка пилгерстана

Зависимости для процесса прокатки трубы в пилигримовом стане:

Начальный радиус гребня валка:

$$p_0 = R_i - R_r \quad (1)$$

Калибрующий или полирующий радиус гребня валка:

$$p_n = R_i - R_r \quad (2)$$

Радиус зева валка

$$p_3 = R_i - R_r - \Delta_1, \quad (3)$$

где Δ_1 - зазор между гильзой и валком.

Значения углов, характеризующих протяжённость участков калибра валка, применяемые на практике: угол валка $\theta_r \leq 60-80^\circ$; угол валка $\theta_n \leq 85-120^\circ$; $\theta_b \leq 10-30^\circ$.

Угол θ_3 должен быть не меньше $140-180^\circ$, так как иначе подающий аппарат не будет успевать возвращать гильзу в валки для захвата $\theta_3 = 360 - (\theta_r + \theta_n + \theta_b)$. Обычно $\theta_a = 155-165^\circ$.

Максимально возможная величина подачи (по П. Т. Емельяненко)

$$\frac{\theta_n}{\mu}$$

$$m_{\max} = 0,25 (D_i - D_n) \omega_n, \quad (4)$$

где D_n — диаметр калибра в полировочном участке, мм;

θ_n — угол полирующего участка калибра, град;

ω_n — коэффициент опережения в полирующем участке, равный 1,06 — 1,10.

Практически применяемые подачи m при толщине стенки трубы $S = 8 \div 10$ мм составляют 20—25 мм; при $S = 15 \div 18$ мм до 25 мм — от 25 до 40 мм. При прокатке с небольшими колебаниями коэффициента вытяжки величина подачи в основном зависит от диаметра валков. Величина подачи в зависимости от диаметра валков приведена в виде номограммы на рисунке 1.

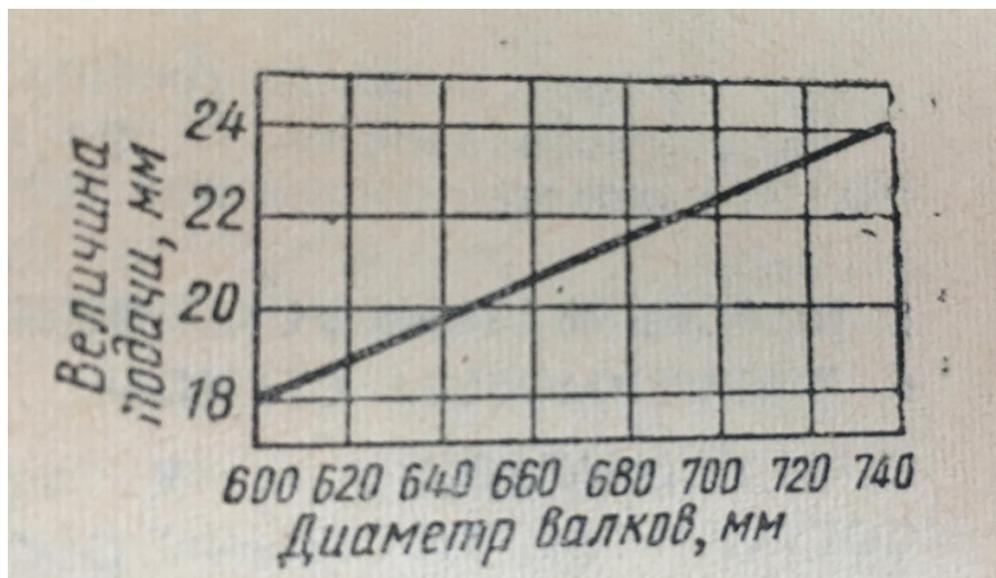


Рисунок 2 - Величина подачи в зависимости от диаметра валков

Суммарный коэффициент вытяжки при пилигримовой прокатке

$$\mu_{\Sigma} = F_{\Gamma} / F_{\Gamma} \cdot \mu_{\Sigma} \quad (5)$$

может достигать величины 20 и более. Обычно на практике $\mu = 7—12$ или чаще 9—11.

Длина трубы, получаемая за каждый оборот валка $l_{\Gamma 1} = m \mu_{\Sigma}$.

Коэффициент полировки Π , характеризующий производительность установки в зависимости от вытяжки в пилигримовом стане, равен отношению длины полирующего участка валков к длине трубы $l_{\Gamma 1}$, полученной за одну подачу $\Pi = l_{\theta \Gamma} / l_{\Gamma 1}$.

Частота вращения валков в зависимости от диаметра трубы и толщины стенки.

1.2 Методы расчета калибровки валков пилгерстанов

1.2.1 Калибровка гребня валков пилигримовых станов

Наиболее сложным вопросом калибровки пилигримовых валков является расчет профиля гребня (обжимной части).

От калибровки гребня валков пилигримовых станов в значительной мере зависит производительность станов, качество прокатываемых труб, расход энергии, износ инструмента и другие показатели процесса.

Первые попытки теоретического определения формы гребня валка, исходя из различных закономерностей распределения обжатий по длине очага деформации, были предприняты Де Граалем и Лобковицем, а затем П. Грюнером. Однако, рекомендуемые указанными авторами уравнения получены при неправильном представлении о действительной схеме деформации металла при пилигримовом процесс и должны быть отнесены к эмпирическим формулам.

Первый валок пилигримового стана, который оказался пригодном для прокатки гильз в трубы, был запатентован Максом Маннесманом 24.02.1891 г (патент № 58762). Данный валок имел четыре участка: боек, полирующий участок, угол продольного выпуска и холостой участок. Данный валок является прототипом существующих валков.

Де Грааль впервые разработал методику построения кривой гребня, позволившей получать более тонкостенные трубы. При этом автор исходил из закона постоянства относительного уменьшения по-

перечного сечения гильзы. Он установил, что для сохранения сплошности металла гильза должна сдвигаться относительно дорна с постоянной скоростью. В основу расчета и построения профиля гребня валка заложен закон изменения отношения скоростей валка и прокатываемого материала, выраженный прямой линией.

Если кривая гребня валка является параболой, выраженной уравнением

$$x^2 = 2Py, \quad (6)$$

то

$$V/C = x/y,$$

где V – скорость прокатываемого металла;

C – скорость валка.

Построение профиля гребня валка ведется графически. Вначале откладывают по оси абсцисс развертку окружности бочки валка (рисунок 2). По оси ординат откладывают половину высоты гребня пилигримового валка (половину разности между диаметром гильзы и диаметром трубы). Затем строят параболу, задаваясь длиной гребня θg в угловых величинах. Эта исходная кривая должна быть перенесена на валок. С этой целью окружность валка разбивают на то же количество участков, что и на ее развертке. Из центра окружности по радиусам откладывают отрезки равные расстоянию от оси валка до пересечения вертикалей с параболой. Таким образом, получают кривую гребня валка. Однако, фактическая кривая, получившаяся после прокатки в валках, отличается от исходной кривой и заметно отличается от параболы. Кривая на валке, профиль которой построен описанным способом, совпадает с исходной кривой и заметно отличается от параболы. Кривая на валке получается естественным способом, т.е. после приработки валков в стане.

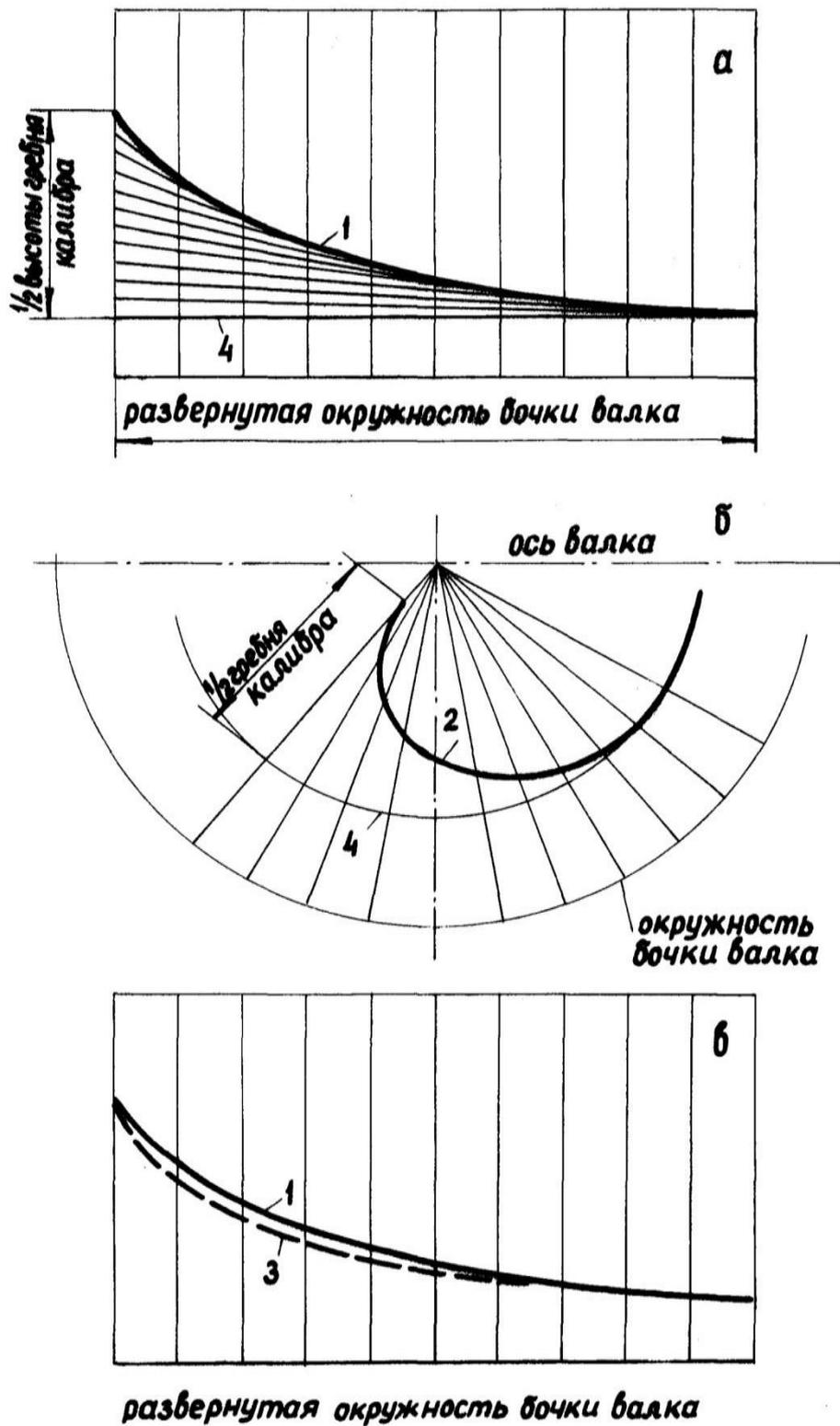


Рисунок 3 - Схема построения профиля гребня пилигримового вала

по методу Де Грааля:

- 1 – кривая А (исходная); 2 – кривая В; 3 – кривая С; 4 – окружность калибра по вершине полирующего участка вала.

Тем не менее, описанный метод применялся в Германии долгие годы и только в последнее время предприняты попытки улучшить калибровки, причем параболическая форма кривой оставлена как основная.

Ошибочность теоретической предпосылки Де Грааля, раскрытая Лобковицем, заключается в том, что он в основу своего параболического уравнения закладывает фактор линейной скорости, тем самым он исходит из не правильного представления, что процесс прокатки лучше всего обеспечивается путем создания постоянных скоростных условий.

Правильно критикуя серьезную ошибку Де Грааля, Лобковиц сам допускает не менее серьезную ошибку. При определении образующей пилигримовой головки он исходил из условий прокатки в непрерывном стане. Сущность рассуждений его сводится к следующему: рабочий конус состоит из бесконечного числа последовательно расположенных калибров или дисков, каждый такой диск соответствует калибру валков непрерывного стана с числом клеток, стремящихся к бесконечности $N \longrightarrow \infty$.

Необходимым условием процесса в непрерывном стане является соблюдение постоянства секундного объема, проходящего через каждый калибр. Следовательно, то же условие должно быть положено в основу размера калибра (дисков) бойка, которым отвечают соответствующие поперечные сечения пилигримовой головки.

Исходя из этих положений Лобковиц для образующей пилигримовой головки получает уравнение, которое представляет собой равностороннюю гиперболу вида

$$2xy = a^2, \quad (7)$$

Перенесение гиперболы на валок производится способом Грааля. Ошибка Лобковица заключается в том, что при пилигримовой прокатке нет необходимости в соблюдении закона постоянства секундных объемов, т.к. при прокатке в каждый данный момент рабочий конус соприкасается с

металлом не всей поверхностью одновременно, а какой-то сравнительно небольшой частью (мгновенный очаг деформации).

В непрерывном стане прокатываемое изделие проходит через ряд последовательно расположенных клетей и, чтобы избежать образования петель или разрывов в металле, соблюдение постоянства секундных объемов здесь является необходимым.

С целью получения тонкостенных труб пилигримовой прокаткой Л.Клейн разработал так называемую “ступенчатую калибровку” (многозонную). В этой калибровке относительное уменьшение поперечного сечения в начальных участках больше, чем в последующих. При обычной калибровке гребень рабочего конуса выполняется в виде плавной кривой, изменяющейся на всем ее протяжении по одному заданному закону. При ступенчатой калибровке гребень (боек) делится на несколько участков “захвата и сглаживания”. На рисунке 4 показана калибровка Клейна, боек которой разбит на три участка: гребень первой части на участке “а” имеет переменный радиус, на втором участке “с” радиус гребня снова переменный. Данная калибровка была разработана Клейном на основе наблюдений, чтобы избежать чрезмерно высоких напряжений в прокатываемом профиле и не подвергать недопустимым нагрузкам валки и дорн.

Ф. Кокс предложил овальную калибровку, в которой формой овала создавалось целесообразное распределение вытяжки по окружности калибра и равномерное распределение давления по всему объему прокатываемого профиля. Этого Кокс достиг, делая калибр пильгервалка сильно овальным с возможно меньшими выпусками боковых сторон.

В 1930 г. в Германии Моосхаксом была предложена многозонная (пазовая) калибровка другого типа, где на различных участках поперечного сечения калибра рабочие и холостые участки чередовались по периметру

калибра с целью выравнивания растяжения, т.е. увеличения продольной вытяжки и уменьшения уширения металла.

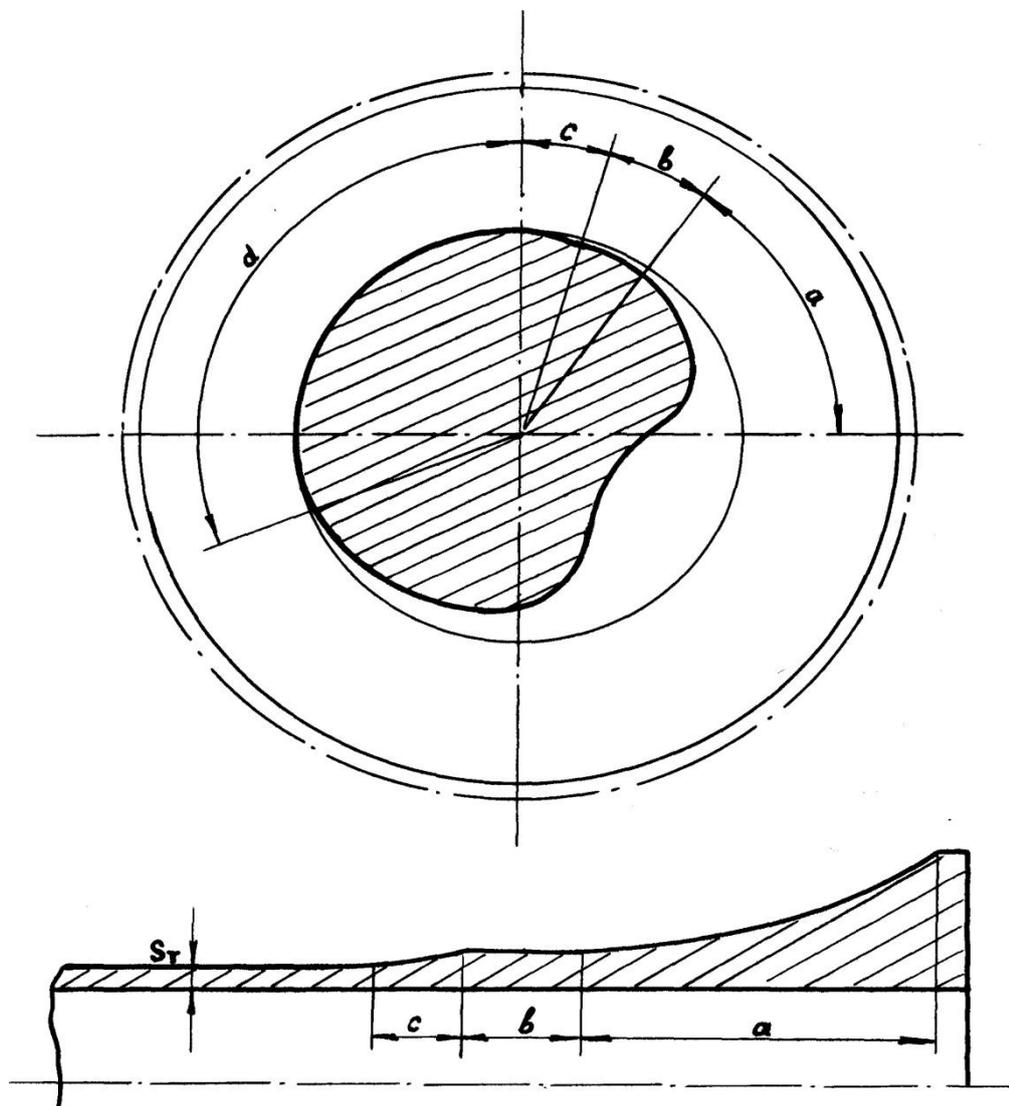


Рисунок 4 - Ступенчатая калибровка валков по Клейну

Холостые участки представляли собой пазы или канавки, нанесенные на обжимной части валков по окружности. Максимальное давление, которое при обычных калибровках возникало в вершине калибра, распределялось в этом случае более равномерно в отдельных зонах деформации по ширине калибра. Угол кантовки при таких калибровках составлял уже не 90° , а выбирался таким образом, чтобы металл, находящийся в холостых участках

при первой подаче, попадал при второй подаче в середину рабочих участков. Эта калибровка на данном этапе оказалась весьма успешной.

Одной из последних для определения профиля гребня валков пилигримовых станов в иностранной литературе является формула П. Грюнера.

Формула П. Грюнера выведена из условий постоянства обжатия по толщине стенки

$$\begin{aligned}R_x &= R_h - S_x, \\S_x &= S_r e^{-bL_r}, \\b &= 1/L_r * I_n * S_r / S_T.\end{aligned}\tag{8}$$

Величина L_r на границе бойка с полирующим участком определяется по формуле

$$L_r = D_B / 2 * \Theta_r,\tag{9}$$

где D_B – диаметр валка по вершине калибра, мм;

Θ_r - величина центрального угла гребня валка, рад.

Данная формула не сложна для расчетов, но автором не даны уравнения для определения величины конечного угла гребня валков и переноса профиля пилигримовой головки на валок.

Значительное развитие данный вопрос получил в трудах советских ученых. Одним из основоположников среди советских ученых в области теории и практики пилигримового способа производства труб был П.Т. Емельяненко.

Формула П.Т. Емельяненко [4] для построения профиля бойка валков пилигримового стана может быть также отнесена к эмпирическим формулам

$$R_x = (R_0 + S_\Gamma) - S_\Gamma \cdot e^{(1+n)\Theta_x c - \frac{n \cdot c}{\Theta_\Gamma} \Theta_x^2}, \quad (10)$$

где Θ_x – центральный переменный угол гребня валка, изменяющийся от нуля до Θ_Γ , град.;

C – константа интегрирования, равная

$$C = 1/\Theta_x \ln S_T / S_\Gamma, \quad (11)$$

n - параметр, определяющий крутизну кривой гребня, названный автором “коэффициентом режима обжатия”.

Максимальное значение коэффициента n , определяется из условия захвата и не должно превышать

$$n \leq \frac{R_0 * \Theta_\Gamma * \varphi}{S_\Gamma \ln \frac{S_\Gamma}{S_T}} - 1 \quad (11)$$

Эмпирическая формула для определения коэффициента режима обжатия, рекомендуемая автором, имеет следующий вид

$$n = 0,35 S_T + 0,05. \quad (12)$$

Формула (46) выведена П.Т. Емельяненко из условия соблюдения постоянства режима обжатия, т.е. из уравнения

$$R_x = (R_0 + S_\Gamma) - S_\Gamma e^{c\Theta_x}. \quad (13)$$

Данная формула подвергнута анализу в работе [5], в которой было показано, что она основана на ошибочной схеме деформации. Согласно этой схеме, величина обжатия в поперечном сечении пилигримовой головки определялась как разность ординат между кривыми гребня головки, смещенными друг относительно друга на величину подачи. В

действительности же истинная величина обжатия в каком – либо сечении головки определяется как разность между ординатами кривой гребня головки, отстоящими друг относительно друга на расстоянии, при котором объем заключенный между ними, равен объему подачи металла [6,7]. Поэтому полученные П.Т. Емельяненко формулы для расчета профиля гребня рабочего участка валков не соответствовали тем исходным предпосылкам, из которых они выводились.

Следует ответить, что калибровка валков по уравнению (10) показала значительно лучшие результаты, чем применявшиеся в то время на заводах калибровки. В связи с этим калибровки П.Т. Емельяненко нашли широкое распространение на отечественных трубных заводах. С другой стороны данное уравнение было первым теоретическим решением построения переменного профиля бойка пилигримовых валков. А.И. Целиков [7], исходя из истинной схемы деформации, ставил перед собой задачу найти профиль пилигримовой головки, отвечающей распределению вытяжек по различным законам. Анализ этого теоретического труда А.И. Целикова дан в работах О.А. Пляцковского [8] и П.К. Тетерина [9].

Уравнение зависимости изменения площади сечения пилигримовой головки по ее длине для основного случая сохранения постоянства вытяжек имеет вид

$$F_x = \frac{F_x}{\frac{\ln \mu_x}{m} X + 1}, \quad (14)$$

где μ_x - частный коэффициент вытяжки в рассматриваемом сечении очага деформации;

X – текущая координата.

Практическое использование уравнения (14) затруднено в связи со сложностью определения значения μ_x . В работе не даны уравнения,

позволяющие осуществить перенос профиля пилигримовой головки на валок. Для определения площади поперечного сечения пилигримовой головки по любому заданному закону распределения смещенной площади

$$\Delta F = \varphi(X)$$

П.К. Тетериним [43] предложено уравнение

$$F_X = c e^{-\frac{1}{V}} \int \varphi(x) dx \quad (15)$$

Выведенная автором формула для нахождения кривой гребня валка имеет вид

$$R_X = R_O - r_g \sqrt{1 + \frac{F_\Gamma \cdot \frac{2-n \cdot \frac{Q_x}{Q_\Gamma} \cdot \frac{Q_x}{Q_\Gamma}}{\mu_\Sigma^{2-n}}}{\pi \cdot r^2 \cdot g}}, \quad (16)$$

где n - коэффициент уменьшения смещенной площади сечения головки от ее начала к концу, определяемый из условия захвата по уравнению (17);

v – объем подачи.

$$n \leq 2 - \frac{\frac{F_\Gamma}{\pi r^2 g} \ln \mu_\Sigma}{\left[\frac{R_O}{r_g} \sqrt{1 + \frac{F_\Gamma}{\pi r^2 g}} - \left(1 + \frac{F_\Gamma}{\pi r^2 g} \right) \right] * \Theta_\Gamma \operatorname{tg} \gamma}, \quad (17)$$

где γ - угол трения.

Величина угла захватного конуса (редуцирования) определяется по формуле

$$R_X = R_O e^{k\Theta_X}, \quad (18)$$

где

$$K = \frac{6\xi \left(R_i + r_g - R_O e^{k\Theta_X} \right) \left(R_i - r_g - R_O e^{k\Theta_X} \right)}{\left(R_i - R_O e^{k\Theta_X} \right) \left(\Theta_\Gamma - \Theta_X \right) R_O e^{k\Theta_X}} \cdot \ln \left(\frac{R_i + r_g - R_O e^{k\Theta_X}}{2r_g + S_\Gamma} \right) \left(\frac{R_i - r_g - R_O e^{k\Theta_X}}{S_\Gamma} \right), \quad (19)$$

где $K = t_g \varphi = 0,4452$ при $\varphi = 24^\circ$;

φ - угол наклона касательной в точке перехода от участка захватного конуса (1) к гребню бойка (2);

участок 1 – определяется из условия затравки;

участок 2 – определяется из условия распределения деформации;

$\xi = 0,1873$ – постоянная величина;

Θ_X – текущее значение угла захватного конуса.

$$R_O = 0,5 \left(D_i - D_\Gamma \right) \quad (20)$$

Радиусы гребня бойка автор рекомендует определять по формуле

$$R_X = R_O - r, \quad (21)$$

где

$$r = r_g \sqrt{1 + \frac{F_{2\Gamma}}{\pi r_g^2} \cdot \mu^{-\xi} \left[12 \frac{\Theta_X}{\Theta_1} + 6A \left(\frac{\Theta_X}{\Theta_1} \right)^2 + 4B \left(\frac{\Theta_X}{\Theta_1} \right)^3 + 3C \left(\frac{\Theta_X}{\Theta_1} \right)^4 \right]}, \quad (22)$$

где $F_{2\Gamma}$ - площадь поперечного сечения гильзы в начале участка 2.

$$F_{2\Gamma} = \left(\frac{D_g}{2} - S_{g\Gamma} \right)^2 \pi S_{2\Gamma}, \quad (23)$$

где $S_{2\Gamma}$ - толщина стенки гильзы (пилигримовой головки) в конце захватного конуса;

$$S_{2\Gamma} = R_{\Pi} - R_{X2} + S_T \quad (24)$$

$$R_{\Pi} = 0,5 \left(D_i - D_T \right) \quad (25)$$

где R_{X2} - радиус гребня валка в конце захватного конуса;

Θ_1 - величина угла бойка за вычетом захватного участка;

A, B, C – постоянные коэффициенты, определяемые предварительно из условий распределения обжатий по кубической параболе;

$$A = 2,42; B = 2,85; C = - 1,18.$$

По мнению автора, при $n = 0$ калибровка отвечает случаю постоянства абсолютной величины смещенной площади, при $n > 0$ – уменьшению смещенной площади сечения пилигримовой головки от ее начала к концу, а при $n < 0$ – увеличению смещенной площади сечения пилигримовой головки от ее начала к концу.

Следует отметить, что при всех прочих правильных предпосылках значение коэффициента n в формуле (16) определяется из представлений об условиях захвата в пилигримовых станах. При подстановке в уравнение (16) исходных данных, взятых автором для расчета

кривой гребня валков (17), и при незначительно отличающихся значениях коэффициентов трения $\varphi = \operatorname{tg} \gamma = 0,33; \varphi = 0,335; \varphi = 0,34$ одна и та же кривая гребня валков будет отвечать всем трем закономерностям изменения смещенной площади сечения пилигримовой головки от ее начала к концу, что не реально. Значение Θ_r подбирается эмпирически.

Расчет кривой гребня бойка по методике П.К. Тетерина с теоретической точки зрения является в настоящее время самым лучшим, но очень трудоемок. В свое время калибровки, рассчитанные по данной методике, показали положительные результаты (пятидесятые годы). Калибровки, рассчитанные по данной методике, работали только на «ЧТПЗ».

Формула для определения кривой гребня бойка О.А. Пляцковского [10] выведена из условия возрастания значений частных вытяжек по длине очага деформации, при котором обеспечивается возможность осуществления процесса затравки с одновременным сохранением «острого» гребня валков.

В основу калибровки О.А. Пляцковского положен профиль пилигримовой головки, отвечающий формуле

$$F_X = F_\Gamma * \mu_\Sigma^{-\varphi\left(\frac{X}{l}\right)}, \quad (26)$$

где μ_Σ - суммарный коэффициент вытяжки, равный отношению площади поперечного сечения гильзы к площади поперечного сечения готовой трубы;

$\varphi\left(\frac{X}{l}\right)$ - принимаемая закономерность изменения смещенной площади по длине головки;

l - длина пилигримовой головки;

X - текущее значение абсциссы, изменяющейся от “0” в начале головки до “l” в конце ее.

Формула О.А. Пляцковского имеет следующий вид

$$\Theta_x = \frac{lR_i}{\ln \mu_\Sigma (R_i^2 - r_g^2)} \ln \left[\left(\frac{R_i - A}{R_i - B} \right)^2 \left(\frac{B + r_g}{A + r_g} \right)^{1-K} \left(\frac{B - r_g}{A - r_g} \right)^{1+K} \right] \quad (27)$$

где

$$l = m\mu_\Sigma \left(\frac{\ln \mu_\Sigma}{\mu_\Sigma - 1} + 1 \right);$$

$$B = \sqrt{\frac{F_\Gamma}{\pi} + r_g^2};$$

$$A = \sqrt{\frac{F_\Gamma}{\pi} \mu_\Sigma^{-\frac{X}{l}} + r_g^2};$$

$$K = \frac{r_g}{R_i}.$$

Уравнение (27) позволяет определять два основных параметра калибровки: переменный угол Θ_x и соответствующий этому углу переменный радиус гребня валка R_x . Значение R_x определяется из уравнения

$$R_x = R_i - A,$$

а величина суммарного угла гребня Θ – из уравнения (27) при подстановке значения $X = l$.

Калибровка, рассчитанная по уравнению (27), позволила повысить производительность пилигримовых установок. Данная калибровка валков

применялась до 80-х годов на трубопрокатных установках с пилигримовыми станами Днепропетровского завода им. К. Либкнехта и

ТГМЗ для прокатки труб диаметром до 325 мм. При расчете гребня пилигримовых валков по формуле (27) получаем величину бойка в пределах 60-70°, что в настоящее время не отвечает требованиям производства труб, как экономичных профилей (тонкостенных), так и толстостенных. Бойки на таких калибровках получаются острыми. Процесс затравки идет тяжело.

Я.Л. Ваткин [11] рекомендует для определения кривой гребня валка следующую формулу

$$R_x = R_i - r_g - S_\Gamma \left(\frac{S_\Gamma}{S_\Gamma} \right)^a \left(\frac{\Theta_\Gamma}{\Theta_x} \right)^{-b} \left(\frac{\Theta_\Gamma}{\Theta_x} \right)^2. \quad (28)$$

Коэффициенты “ a ” и “ b ” вычисляются из следующих зависимостей:

$$a = 2,1 - 0,12 \frac{S_\Gamma}{S_\Gamma};$$

$$b = 1,1 - 0,12 \frac{S_\Gamma}{S_\Gamma}.$$

Результаты расчета по формуле (28) близко совпадают с результатами расчета по формуле (10), но данная формула не имеет никакой теоретической ценности, т.к. она является чисто эмпирической. Преимуществом данной формулы перед формулой (10) является то, что расчеты по ней проще в несколько раз, а точность близка к данным формулы (10).

К другим эмпирическим формулам для расчета гребня бойка относится формула Л.А. Вербицкого [12]

$$R_X = R_i - r_g - S_\Gamma \left(\frac{S_\Gamma}{S_\Gamma} \right)^{\frac{\Theta_X}{\Theta_\Gamma}} . \quad (29)$$

Формула (29) является точной копией формулы Я.Л. Ваткина (28)

за исключением показателя степени при отношении толщины стенки трубы к стенке гильзы.

Результаты расчета гребня бойка по данным формулам получаются аналогичные, за исключением того, что расчет по формуле

(28) несколько сложнее, чем по формуле (29) из-за показателя степени при $\left(\frac{S_\Gamma}{S_\Gamma} \right)$.

И.А. Фомичев [14] для определения гребня бойка предложил формулу

$$R_X = R_\Pi - \frac{R_\Pi - R_O}{\Theta_\Gamma^\Pi} \left(\Theta_\Gamma - \Theta_X \right)^n , \quad (30)$$

где n – коэффициент крутизны гребня, равный 2,25.

Результаты расчета по формуле (67) близки к расчетам по формулам (65) и (66). Переход от бойка к полирующему участку по данной формуле получается плавным, что на современном этапе для прокатки особо тонкостенных труб является актуальным.

В.А. Писаненко [14] для определения образующей пилигримовой головки рекомендует следующее уравнение

$$D_{Xn} = \sqrt{S \frac{n-1}{2} \left(\Theta_\Gamma^2 - D_\Gamma^2 \right) + D_\Gamma} , \quad (31)$$

где D_{Xn} - диаметр пилигримовой головки в сечении n ;

n – порядковый номер сечения пилигримовой головки;

S – постоянное для данной калибровки число, равное отношению коэффициента вытяжки в любых двух смежных сечениях, отстоящих одно от другого на расстоянии величины подачи.

Исходным положением автора является линейное изменение коэффициентов вытяжки. При выводе уравнения автор исходил из ошибочной схемы деформации, считая, что коэффициент вытяжки в пилигримовом процессе определяется отношением площади одного поперечного сечения пилигримовой головки к площади другого, отстоящего от первого (в направлении готовой трубы) на расстоянии величины подачи. Формула, будучи искусственно составленной, является не совершенной, и пользование ею затруднено.

А.А Чернявским [15] предложена следующая формула для определения гребня (бойка)

$$R_x = R_i - \sqrt{r_s^2 + \frac{F_x}{\pi}}, \quad (32)$$

где F_x - площадь сечения пилигримовой головки, определяемая по формуле

$$F_x = \frac{\ln \left(1 + n^{\frac{x}{l}} \right)}{\ln (1 + n)} \quad (33)$$

$$F_x = F_0 \mu_0,$$

где F_0 - сумма площадей поперечного сечения гильзы и кольцевого зазора между гильзой и дорном;

μ_0 - фиктивный суммарный коэффициент вытяжки;

n – коэффициент уменьшения смещенной площади пилигримовой головки.

$$\mu_0 = \frac{F_0}{F_T},$$

$$n \leq \frac{1}{N} \left(\sqrt{\frac{6}{N}} - 3,75 - 1,5 \right), \quad (34)$$

$$N = \frac{\frac{4F_0}{\pi D_g^2} \cdot \ln \mu_0}{2 \left[1,5 \frac{D_i}{D_g} \sqrt{\frac{4F_0}{\pi D_g^2} + 1} - \left(\frac{4F_0}{\pi D_g^2} + 1 \right) A \Theta_\Gamma \right]}, \quad (35)$$

где $A = \text{tg} \left[15 - 1,20 \overline{\gamma} \right]$,

γ - угол трения между поверхностью вала и металла, обычно изменяющийся в пределах 19 - 24°;

Θ_Γ - угол гребня бойка, рад.

Эмпирическое значение $\text{tg} \gamma = \varphi = 0,33 - 0,34$.

$$N = 0,3115.$$

Нетрудно убедиться, что для различных реальных условий прокатки значение постоянной величины N никогда не превышает единицы и, таким образом, коэффициент n никогда не может быть меньше нуля.

Значение n определяется по формуле (34) или графически. Графически n определяют точкой пересечения двух кривых

$$\gamma_1 = \lg \left(1 + n \right),$$

и
$$\gamma_2 = \frac{N}{2,303} n.$$

Вначале подсчитывают для конкретных условий величину N , а затем, задаваясь различными коэффициентами n , строят кривые.

Расчет по данной формуле является очень сложным и неудобным. Гребень, подсчитанный по данной формуле, получается очень острым, а, следовательно, валки будут плохо затравлять гильзу. А так как переход гребня к полирующему участку получается резким, то при прокатке тонкостенных труб будет наблюдаться потеря продольной устойчивости прокатываемого профиля, а на трубах будут иметь место бугры и рванины.

Ю.М. Матвеев и М.А. Шубик [16] рекомендуют для определения кривой гребня валка следующую эмпирическую формулу

$$R_{\Pi} = R_{O} + \gamma_{\Pi}, \quad (36)$$

$$\gamma_{\Pi} = \frac{n}{z} \left(3 - 2\sqrt{\frac{n}{z}} \right) \left(S_{\Gamma} - S_{T} \right), \quad (37)$$

где γ_{Π} – суммарное приращение радиуса гребня от R_{O} до R_{Π} ;

n – порядковый номер рассматриваемого участка гребня;

$$1 \leq n \leq Z.$$

Длину гребня авторы рекомендуют определять по формуле

$$l_{\Gamma} = \frac{m \mu_{\Sigma} K - 1}{\mu_1 - 1}, \quad (38)$$

где K – коэффициент, учитывающий удлинение в полирующем участке;

$$K = 0,8 - 0,9;$$

μ_1 – коэффициент вытяжки;

$$\mu_1 = 1,6 - 1,8.$$

По данной формуле боек получается очень тупым. Величиной бойка надо задаваться. В нулевой точке боек получается завышенным на 10-15 мм, что безусловно ухудшает работу валков. Профиль гребня валков аналитического выражения не имеет и его построение ведется графоаналитическим методом. Валки, построенные по данной методике, оказались не работоспособными.

При разработке своего метода авторы допускают ряд ошибок. В силу этого профиль гребня рабочего участка валков, построенный по их методике, не соответствует его исходным предпосылкам. Следует также отметить, что предложенный авторами графоаналитический метод калибровки гребня валков является несовершенным, сложным и громоздким. Валки по данной методике не рассчитывались и не работали. Тонкостенная калибровка “ЧТПЗ” шестидесятых годов была построена по средним данным приближенных расчетов по методу Ю.М.

Матвеева, М.А. Шубика и П.К. Тетерина.

Ю.Ф. Шевакиным и Б.Н. Матвеевым [17] для определения профиля гребня бойка предложена формула

$$R_X = R_{\Gamma} - S_X, \quad (39)$$

где S_X - толщина стенки пилигримовой головки.

Толщина стенки переходной зоны пилигримовой головки авторы приняли изменяющейся по следующей зависимости

$$S_X = S_{\Gamma} + \epsilon_{\Gamma} - S_{\Gamma} \frac{1 - \frac{X}{L}}{1 + \frac{X}{C}}, \quad (40)$$

где L - длина переходной зоны пилигримовой головки;

C - величина, от которой зависит интенсивность уменьшения толщины стенки по длине переходной зоны.

Формула (77) удовлетворяет граничным условиям:

$$X = 0; S_X = S_T; X = L; S_X = S_T.$$

Величина C определяется по уравнению

$$C = \frac{\sqrt{B^2 + 2AD}}{2A} - B; \quad (41)$$

$$A = g\mu_\Sigma - 1; B = g\mu_\Sigma m^{1,2} - \left(-m\mu_\Sigma \right)^{1,2} + Lm^{0,2};$$

$$D = Lm^{0,2} \cdot \left(-m\mu_\Sigma \right)^{1,2};$$

$$g = \left(\frac{P_K}{P_H} \right)^2 \left(\frac{D_K}{D_H} \right)^2 \cdot \frac{R_K}{R_H} \left(\frac{P_H}{P_K} \right)^2;$$

где $\frac{P_K}{P_H}$ - отношение средних удельных давлений в конце и в начале обжимной части валка (определяется ориентировочно);

D_H, D_K, R_H, R_K - диаметры калибра и радиусы валков по вершине калибра в начале и в конце обжимной части валков;

$\frac{P_H}{P_K}$ - задаваемое отношение давлений металла на валки в начале и в конце обжимной части ручья валков.

В основу данного метода построения гребня пилигримового валка заложена методика, разработанная Ю.Ф. Шевакиным, позволяющая для случая холодной прокатки труб получить профиль обжимной части ручья при заданном изменении какого - либо параметра процесса

[51]. Такими параметрами могут быть абсолютное или относительное обжатие стенки или площади поперечного сечения трубы, смещенный объем металла, давление металла на валки и другие. В данном случае профиль гребня валков определяли, исходя из заданного изменения давления металла на валки по формуле

$$g = \frac{\Delta S_H}{\Delta S_K} = \left(\frac{P_K}{P_H} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_K}{D_H} \right)^2 \cdot \frac{R_K}{R_H} \left(\frac{P_H}{P_K} \right)^2. \quad (42)$$

Подставив в формулу (42) заданное отношение $\frac{R_H}{R_K}$ определим g , а затем по формуле (41) определим значение C , т.е. получим уравнение кривой пилигримовой головки (40), отвечающее заданному изменению давления металла на валки по длине ручья.

Расчеты по данной методике очень сложные. Необходимо задаваться отношением давления металла на валки в начале и в конце обжимной части. Точность расчета и работоспособность калибровки зависят от навыков исследователя. Расчеты по данной методике дают острые гребни, а, следовательно, плохие условия затравки. Калибровка валков, полученная авторами для прокатки тонкостенных труб на пилигримовой установке 8-16" "ЧТПЗ", оказалась не работоспособной.

Однако [18] авторами по данной методике рассчитана новая калибровка валков для прокатки тонкостенных труб, которая в условиях завода им. К. Либкнехта показала положительные результаты.

С целью улучшения условия захвата металла пилигримовыми валками и увеличения вытяжки за счет значительного снижения поперечного истечения металла (уширения) в работах [19-22] предложено на части гребня валка наплавлять специальные продольные валики из износостойкого сплава, как это схематически показано на рисунке 4.

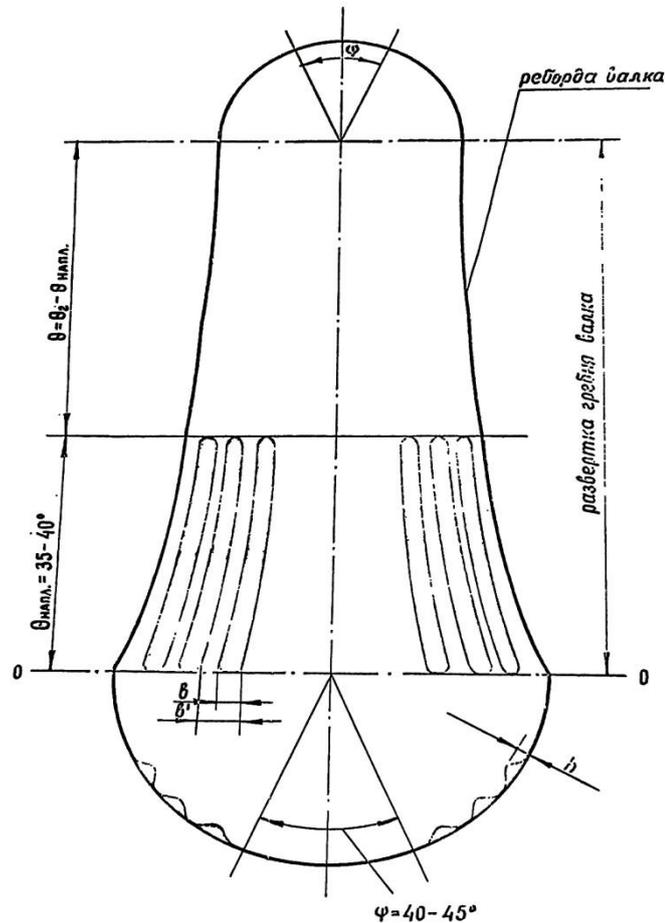


Рисунок 5 - Схема нанесения валиков на рабочей части пилигриморвого валька и их геометрические размеры: b - ширина валиков – 25 - 35 мм;

h – высота валиков – 3 – 5 мм; b^1 - шаг валиков – 2 – 2,5в.

Такое расположение валиков приводит к увеличению продольной деформации – вытяжки, значительно сокращая поперечную – уширение. В связи с наплавкой валиков повышается коэффициент и поверхность трения, что приводит к улучшению процесса затравки, уменьшению вероятности пробуксовки валков и сокращению неустановившегося процесса прокатки.

Кроме этого, в связи с улучшением условий захвата новая калибровка валков может быть выполнена с большей крутизной в начале гребня валька.

В результате этого усовершенствования процесс прокатки можно вести с большими подачами, что ведет к увеличению производительности.

Валиковая калибровка позволяет уменьшить износ валков и снизить величину обреза передних концов труб.

Весьма важно при изготовлении данной калибровки определить форму, размеры и расположение валиков на поверхности валка, так как от этого зависит не только производительность стана, но и главным образом качество труб, особенно по наружной поверхности. Одним и самым главным недостатком данной калибровки является изготовления (наплавки) валиков и плавность их сопряжения с телом валка.

В работе [24] рассматривается аналитический метод корректировки профиля гребня ручья пилигримовых валков. Авторы исходят из того, что при переносе пилигримовой головки (рабочего гребня) на рабочий инструмент (пилигримовые валки) весьма сложно учесть такие факторы, как упругую деформацию деталей рабочей клетки и инструмента. Практика эксплуатации станов пилигримовой прокатки показывает, что очень часто приходится производить доработку (корректировку) уже существующей калибровки путем перераспределения обжатия в целях повышения производительности, качества труб, стойкости валков и т.п. Экспериментальное определение параметров дорабатываемой калибровки сводит к минимуму влияние факторов, не учтенных при первоначальном теоретическом расчете.

Авторы исходят из схемы деформации металла при пилигримовой прокатке труб, изложенной П.Т. Емельяненко [25], согласно которой справедливы следующие соотношения

$$\int_{X-h}^X F \epsilon d\xi = mF_{\Gamma};$$

$$F \left[\frac{X-h}{X} \right] F = \varphi; \quad (43)$$

$$0 \leq X \leq l + m \frac{F_{\Gamma}}{F_T} ;$$

где h_X - линейное смещение металла;

$\varphi_{\langle \rangle}$ - абсолютное обжатие пилигримовой головки за цикл прокатки;

l - длина переходного участка между гильзой и готовой трубой (длина пилигримовой головки).

Представив уравнения схемы деформации по П.Т. Емельяненко в аналитическом виде и разложив их в ряд Тейлора, ограничиваясь вторыми членами разложения, авторами получено линеаризованное уравнение схемы деформации в дифференциальном виде:

$$\frac{dF_{\langle \rangle}}{dX} = -\frac{F_{\langle \rangle}}{mF_{\Gamma}} \cdot \varphi_{\langle \rangle} - \frac{1}{2} \cdot \frac{d\varphi_{\langle \rangle}}{dX} . \quad (44)$$

Если имеются две пилигримовые головки, для которых функция относительного обжатия на величину $\delta\varphi_{\langle \rangle}$ на интервале $X_0 \leq X \leq X_k$, то их различие в площади поперечного сечения $\delta F_{\langle \rangle}$ определяется из

выражения

$$\delta F_{\langle \rangle} = -\frac{1}{2} \delta\varphi_{\langle \rangle} - \frac{1}{mF_{\Gamma}} \cdot eX_p \left(-\frac{1}{mF_{O_{X_0}}} \int_{X_0}^X \varphi_{\langle \rangle} d\xi \right) \int_{X_0}^X d\varphi_{\langle \rangle} \left[F_{\langle \rangle} - \frac{1}{2} \varphi_{\langle \rangle} \right]^* \\ eX_p \left[\frac{1}{mF_{O_{X_0}}} * \int_{X_0}^X \varphi_{\langle \rangle} d\xi \right] d\xi.$$

Корректировка калибровки сводится к выбору функции $\delta\varphi_{\langle \rangle}$.

Авторы выводят функцию $\delta\varphi_{\langle x \rangle}$ для условия заданного уменьшения разностенности прокатываемых труб, вызванной уширением

металла в процессе прокатки, которая имеет следующий вид

$$\delta\varphi_{\langle x \rangle} = \delta\varphi_{0\langle x \rangle} - \frac{\int_{x_0}^x \left[1 + \sin 2\pi \left(0,75 - \frac{X_K - X}{X_K - X_0} \right) \right] \delta\varphi_{0\langle x \rangle} \left[F_x - \frac{1}{2} \varphi_{\langle x \rangle} \right] e^{X_p} \left[\frac{1}{mF_{\Gamma}} \int_{x_0}^x \varphi_{\langle \xi \rangle} d\xi \right] d_x}{\int_{x_0}^x \left[1 + \sin 2\pi \left(0,75 - \frac{X_K - X}{X_K - X_0} \right) \right] \left[F_{\langle x \rangle} - \frac{1}{2} \varphi_{\langle x \rangle} \right] e^{X_p} \left[\frac{1}{mF_{\Gamma}} \int_{x_0}^x \varphi_{\langle \xi \rangle} d\xi \right] d_x}$$

$$\delta\varphi_{0\langle x \rangle} \approx 10 \sqrt{F_{\langle x \rangle} + \varphi_{\langle x \rangle} + \pi e^2 g} * \delta\Delta r_{\langle x \rangle}; \quad (46)$$

где $F_{\langle x \rangle}$ – определяемые экспериментально площадь поперечного сечения и $\varphi_{\langle x \rangle}$ – функция абсолютного обжатия пилигримовой головки, соответствующие дорабатываемой калибровке.

Функцию $\varphi_{\langle x \rangle}$ можно определять по результатам обмера прокатанной пилигримовой головки с помощью разработанного в работе графоаналитического метода.

Методика корректировки профиля гребня пилигримовых валков, предложенная авторами [23], очень сложная, не позволяет получать работоспособные калибровки и не приемлема к использованию в производственных условиях.

В работе С.А. Борисенко [26] приведена методика профилировки гребня пилигримовых валков по соотношению радиусов кривизны формирующей поверхности. Данная методика применялась только на заводе им. Ильича в г. Мареуполе (Жданове). Графическое профилирование гребня пилигримовых валков очень сложно, требует большого производственного

опыта и многочисленных корректировок валков в процессе работы. Практической ценности данная методика не имеет.

1.2.2. Калибровка полирующего участка валков пилигримовых станов

Угол полирующего участка (Θ_{Π}) определяется из условия получения труб, удовлетворяющим требованиям по толщине стенки.

От протяженности полирующего участка и соотношения между его углом и центральным углом гребня валков в значительной мере зависят работа стана, эффективность калибровки и качество прокатываемых труб.

П.Т. Емельяненко [4] приводит формулу для определения максимально возможной величины подачи при условии получения качественных труб по стенке

$$m_{\max} = 0,25 \Phi_i - D_{\text{к}} \frac{\Theta_{\Pi}}{\mu_{\Sigma}} \omega_{\Pi}, \quad (47)$$

где ω_{Π} -коэффициент опережения в полирующем участке, равный 1,06–1,10.

Таким образом, величина подачи в пилигримовом стане прямо пропорциональна катающему диаметру, а также углу полирующего участка и обратно пропорциональна коэффициенту вытяжки.

Из уравнения (47) можно определить величину центрального угла полирующего участка, необходимого для получения качественных

Из уравнения (47) можно определить величину центрального угла полирующего участка, необходимого для получения качественных труб по стенке, задаваясь величиной подачи

$$\Theta_{\Pi} = \frac{m\mu_{\Sigma}}{0,25 \Phi_i - D_{\text{к}} \omega_{\Pi}}. \quad (48)$$

Отсюда П.Т. Емельяненко делает вывод, что при калибровке валков необходимо задаваться углом полирующего участка максимально возможной величины.

Однако следует учитывать то обстоятельство, что сумма всех углов рабочей части ($\Theta_{\Gamma} + \Theta_{\Pi} + \Theta_{\text{вбл}}$) не должна превышать 210-220°, так как при малом угле холостой части калибра подающий аппарат не будет успевать возвращать гильзу на линию, где осуществляется ее захват валками.

О.А. Пляцковский [42] приводит данную формулу в следующем виде

$$\Theta_{\Pi} = \frac{\epsilon,0 - 2,1 \overline{m\mu_{\Sigma}}}{R_i - R_k \overline{\omega_{\Pi}}}, \quad (49)$$

где $\overline{\omega_{\Pi}} = 1,18 - 1,20$.

Ю.М. Матвеев и М.А. Шубик рекомендуют определять длину полирующего участка по формуле:

$$L_{\Pi} \geq m\mu_{\Sigma} (\epsilon + 2) \overline{k}, \quad (50)$$

где k - коэффициент, учитывающий удлинение во второй зоне полирующего участка валков, равный 0,8 – 0,9.

Из формулы (50) можно определить величину центрального угла полирующего участка

$$\Theta_{\Pi} \geq \frac{m\mu_{\Sigma} (\epsilon + 2) \overline{k} \cdot 360}{2\pi R_{\Pi}}. \quad (51)$$

По мнению авторов для обеспечения требуемого качества труб при работе на расчетной подаче длину полирующего участка следует выбирать с максимально возможным запасом. Они мотивируют это

тем, что подающие аппараты не гарантируют постоянство подачи и при $m \succ m_{ном}$ трубы не будут отвечать требованиям по геометрическим размерам.

Данная формула так же, как и формулы (11) и (12) не учитывает технических характеристик подающих аппаратов.

В работе [26] авторы рекомендуют угол полирующего участка определять по формуле

$$\Theta_{\Pi} = \frac{0,0 - 2,9 \overline{m} \mu_{\Sigma}}{R_K}, \quad (52)$$

где R_K - катающий радиус на полирующем участке, равный $\omega_{\Pi} R_{\Pi}$, причем $\omega_{\Pi} = 1,18 - 1,20$.

В формулах (49) и (52) большие значения коэффициентов, стоящие в скобках, соответствуют трубам повышенного качества.

Согласно формулам (48), (49), (51) и (52) увеличение полирующего участка должно привести к возможности увеличения подачи, т.е. производительность стана. Однако, увеличение Θ_{Π} может происходить только за счет сокращения угла продольного выпуска. Уменьшение холостого участка неизбежно ведет к снижению числа оборотов валков, так как за это время не успевает произойти возврат гильзы.

Нельзя считать оправданными попытки увеличить угол полирующего участка за счет сокращения гребня валков, так как при этом более интенсивно увеличивается объем металла, который должен быть раскатан на полирующем участке. При этом подача не увеличи-

вается, а сокращается, и, как следствие, уменьшается производительность стана. При сокращении обжимного участка валков увеличивается нагрузка на рабочую клетку и линию главного привода, а это в

свою очередь приводит к снижению стойкости рабочего инструмента и перенапряжению прокатываемого профиля, т.е. к рванинам на поверхности тонкостенных труб.

Нельзя также сокращать и величину угла продольного выпуска, потому что это приведет к появлению бугров на трубах, увеличению продольной разностенности и потере продольной устойчивости при прокатке тонкостенных труб.

Из данных уравнений следует, что значение угла полирующего участка (Θ_{Π}) определяется вне зависимости от технической характеристики подающих аппаратов и оптимального числа оборотов валков пилигримовых станов. Это не позволяет использовать возможности пилигримовых станов по достижению максимальной производительности.

В работах А.А. Чернявского [15, 27] сделана попытка решения этой задачи. Для расчета величины центрального угла полирующего участка валков предложена следующая формула

$$\Theta_{\Pi} = 0,085 \frac{N}{\xi^2} \left(\sqrt{1 - 25 \frac{\xi^2 \gamma}{N}} - 1 \right); \quad (53)$$

где
$$N = \frac{1}{0,011A + 0,042 \sqrt{\frac{D}{B_1}}}; \quad \gamma = 2\pi - \Theta_{\Gamma};$$

$$D = \frac{G \left(\frac{\pi}{30} R_{\Pi} \omega_{\Pi} \right)}{g \left(P_1 S_1 - P_2 S_2 + \varphi G \right)}; \quad B = 0,278 \left[l_2 \left(Q_2 v - D_{20} \right) \right];$$

$$l_1 = \int_0^{\Theta_x} R_{ГК} d\Theta_{Г} + m; \mathcal{M} = \frac{0,1N}{\sqrt{B_1}};$$

$$\xi = \left[\frac{R_{\Pi} \omega_{\Pi} - 4N}{8\sqrt{\frac{M}{4}} \left[\dots + R_{\Pi} \omega_{\Pi} + N\gamma - \Theta_{\Pi} \right]} - \frac{MR_0 \omega_{\Pi}}{4\sqrt{l_1 + R_{\Pi} \omega_{\Pi} \Theta_{\Pi}}} \right];$$

или приближенно

$$l_1 = R_{cГ} \omega_{Г} \Theta_{Г} + m;$$

$$a_2 = \frac{P_1 S_2 g}{G}; D_{2v} = \frac{P_1 S_1 - \varphi G}{P_1 S_2};$$

где P_1 - величина давления воздуха в цилиндре подающего аппарата при движении перемещения масс по инерции, равная давлению воздуха в воздухохоборнике;

P_2 - величина противодействия воздуха в цилиндре подающего аппарата (в камере противодействия) при движении перемещающихся масс по инерции;

S_1 и S_2 - площади поперечного сечения поршня подающего аппарата в камерах давления и противодействия;

G - вес движущихся масс (поршня, кресткофа, дорна, гильзы, дорнового кольца и т.п.);

φ - коэффициент трения скольжения поршня о стенки цилиндра и дорновой головки по направляющим;

$R_{ГК}$ - катающий радиус по гребню валка;

$R_{C.Г.}$ - средний радиус гребня по вершине калибра;

$\omega_{Г}$ - средняя величина коэффициента опережения по длине очага деформации валка;

l_1 - длина пути, проходимого движущимися массами при откате всей системы гребнем валка, плюс величина подачи;

g - ускорение силы тяжести.

Данная формула для определения величины центрального угла полирующего участка очень сложная и относится к разряду эмпирических, т.к. в формулу входят очень много величин ($P_1, P_2, G, \varphi, R_{cГ}$ и l_1), которые являются переменными величинами, зависящими от состояния оборудования, веса инструмента и других субъективных факторов. Заводская практика и потребность в увеличении выпуска экономичных профилей труб выработали оптимальные величины углов полирующего участка, величина которого не превышает 80 - 90°.

В последние годы на заводах Советского Союза намечалась тенденция к увеличению обжимной части валков за счет увеличения плавного перехода от бойка к полирующему участку.

До середины 80 - годов 20 - го века при расчете калибровок пилигримовых валков полирующий участок на всем его протяжении очерчивали постоянным радиусом

$$R_{\Pi} = 0,5 \Phi_i - D_{\text{к}} \quad (54)$$

В работах [28 - 29] рекомендуется разбивка полирующего участка валка на три части, имеющие разные длины и профиль.

Специальные исследования в производственных условиях показали, что даже при оптимальной длине полирующего участка конец гребня валка и начало полирующего участка несколько переполняются металлом, что приводит к образованию уса, возникающего от уширения металла, утолщению стенки трубы за счет деформации клетки пилигримового стана и образованию бугров на поверхности труб, выводящих толщину стенки за пределы плюсового допуска ГОСТа.

Механизм переполнения калибра металлом в начале полирующего участка авторы [28, 29] объясняют следующим образом.

Передний конус валков (гребень) выполняет при деформации металла две функции: одна часть объема металла раскатывается непосредственно бойком, а другая – смещается бойком в полирующий участок, где деформируется до размеров готовой трубы. Таким образом, суммарная вытяжка гильзы на пилигримовом стане является произведением вытяжек в обжимном (на гребне) и полирующей части калибра.

Наиболее значительная часть металла, смещенная бойком в полирующий участок, идет не только на вытяжку, но и на уширение. Если не предусматривать этой деформации, то металл уйдет в зазоры между бочками валков, образуя “усы”. На самом деле здесь авторы данных работ не учитывают еще два направления течения металла, а именно, кроме уширения лишний объем металла будет переходить в стенку трубы за счет деформации клетки от больших нагрузок и будет образовывать перекатывающуюся волну (бугор) перед валком, которая за следующий цикл прокатки (после кантовки на 90°) уже ничем не может быть сглажена, т.е. будет образовывать на трубах продольную разностенность.

В связи с этим они рекомендуют разбивать полирующий участок на три зоны. Первая зона, непосредственно примыкающая к гребню, имеет диаметр калибра, несколько больший наружного диаметра трубы после пильгерования, т.е.

$$D_{K1} = D_K + \Delta K, \quad (55)$$

где ΔK - припуск на диаметр, равный 1-3 мм (меньшие значения принимают для труб меньших диаметров).

Благодаря этому, первая зона может обеспечить деформацию поступающего в нее смещенного объема металла без значительного уширения металла. С этим выводом частично можно согласиться, т.к. он не лишен логики.

Вторая (выходная) зона полирующего участка осуществляет разглаживание (полировку) трубы и доведение ее диаметра до необходимых размеров. Здесь необходимо сделать поправку, что данная зона полирующего участка осуществляет разглаживание (полировку) трубы и доведение не диаметра, а стенки до необходимых размеров. Калибр в этой части вала должен иметь размер, равный наружному диаметру трубы после пильгерования, т.е. D_K .

Между этими двумя зонами располагается переходная зона, в которой диаметр калибра плавно уменьшается от значения D_{K1} до D_K . Что касается протяженности отдельных зон полирующего участка, то авторы рекомендуют их рассчитывать, исходя из общей деформации металла в полирующем участке.

Ошибки, допущенные авторами [28,29] в данном вопросе будут рассмотрены ниже.

1.2.3 Калибровка угла продольного выпуска

Калибровка угла продольного выпуска валков ($\Theta_{вых}$) оказывает существенное влияние на качество труб. Угол продольного выпуска обеспечивает плавное отделение валка от трубы и уменьшает бугристость труб (продольную разностенность).

Вопрос калибровки угла продольного выпуска валков в литературе освещен очень плохо.

На практике угол продольного выпуска (выходной участок) до настоящего времени выбирался в пределах $15 - 20^\circ$ и строился на глаз, по плавной кривой.

По данным П.Т. Емельяненко [4] радиус гребня выходного участка должен на протяжении $10 - 15^\circ$ уменьшаться не более, чем на $1,5-2,5$ мм. Это условие у П.Т. Емельяненко имеет следующий вид

$$\begin{aligned} \Theta_{вых} &= 10 - 15^\circ, \\ R_{вых} &\leq R_{П} - \overline{1,5 - 2,5}. \end{aligned} \quad (56)$$

Меньшие значения он рекомендует брать при прокатке труб меньшего диаметра, а большие – при прокатке труб большего диаметра. Данные П.Т. Емельяненко устарели и не отвечают современным требованиям, предъявляемым к трубам по геометрическим размерам.

Впервые аналитический метод расчета профиля кривой угла продольного выпуска дан П.К. Тетериным [43].

П.К. Тетерин считает, что наиболее плавное отделение валка от трубы будет достигнуто в том случае, если образующая выходного участка будет представлять собой прямую (рисунок 5).

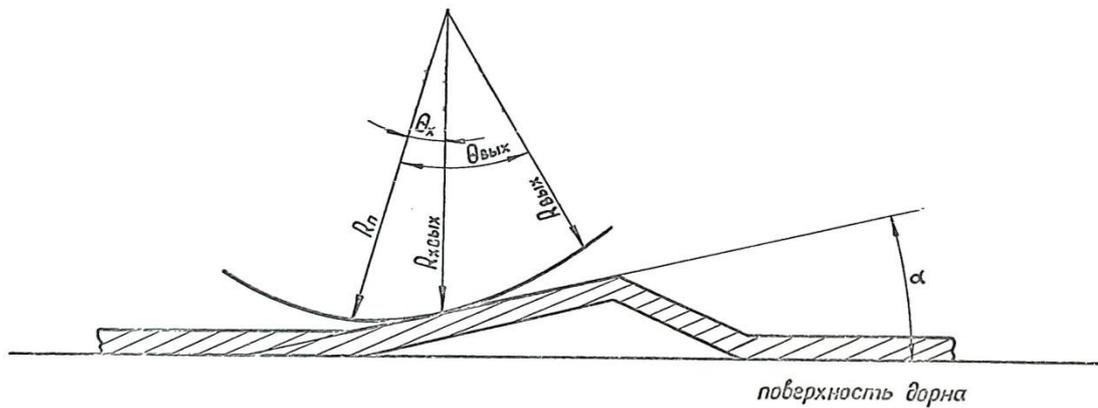


Рисунок 6 - Схема определения профиля угла продольного выпуска

Исходя из этого условия, он определил профиль кривой угла продольного выпуска. П.К. Тетерин допускает, что кривая гребня выходного участка валка катится по образующей трубы без скольжения. Тогда имеет место равенство:

$$\frac{dR_x}{R_x} = k^1 d\Theta_{x \text{ вых}}, \quad (57)$$

Или после интегрирования

$$R_x = ce^{-k^1 \Theta_x}, \quad (58)$$

где R_x и Θ_x - текущие значения радиуса и угла продольного выпуска;

k^1 - тангенс угла α ;

c - постоянная интегрирования.

Граничными условиями равенства (58) будут

$$\Theta_x = 0; R_x = R_{\Pi}; \quad \Theta_x = \Theta_{x \text{ вых}}; R_x = R_{\text{вых}}.$$

Использование граничных условий дает искомый профиль кри-

вой угла продольного выпуска

$$R_{X_{\text{блх}}} = R_{\Pi} \left(\frac{R_{\Pi}}{R_{\text{блх}}} \right)^{\frac{\Theta_X}{\Theta_{\text{блх}}}}. \quad (59)$$

Формула (96) неудобна тем, что для определения текущего значения радиуса угла продольного выпуска ($R_{X_{\text{блх}}}$), необходимо задаваться радиусом гребня ($R_{\text{блх}}$) в конце выходного участка и величиной центрального угла продольного выпуска ($\Theta_{\text{блх}}$). Получается, что данное уравнение имеет три неизвестных.

Ю.М. Матвеев говорит о том, что, несмотря на увеличение высоты калибра, в продольном угле выпуска по сравнению с диаметром трубы, часть его все же находится в соприкосновении с последней, так как возникла необходимая бугристость трубы, ее овальность и другие местные отступления в результате каких-либо ненормальностей в процессе разглаживания поверхности трубы и доводки наружного диаметра ее в полирующем участке.

Анализ осциллограмм суммарного давления металла на валки и сил трения говорят о том, что не только часть, но и весь угол продольного выпуска находится в контакте с трубой и часть холостого участка.

Далее автор делает вывод, что для хорошей работы валков не следует резко уменьшать радиус вала в продольном выпуске, так как это может привести к ухудшению наружной поверхности трубы. Практикой установлена величина угла продольного выпуска $\Theta_{\text{блх}} = 15 - 20^\circ$, а плавное уменьшение радиуса вала в пределах этого угла не должно превышать 1,5-2,0 мм.

Автор говорит о плавном переходе от полирующего участка

к углу продольного выпуска и одновременно рекомендует изменение радиуса валка принимать по параболической кривой, которая в пределах угла продольного выпуска выражается следующим уравнением

$$R_{X_{\text{выл}}} = R_{\Pi} - \Delta \sqrt{\frac{\Theta_{X_{\text{выл}}}}{\Theta_{\text{выл}}}}, \quad (60)$$

где Δ – суммарное уменьшение радиуса, равное 1,5 – 2,0 мм.

При расчете радиусов угла продольного выпуска по формуле (60) получаем, что при $\Theta_X = 5^\circ$ значение $\Delta \sqrt{\frac{\Theta_{X_{\text{выл}}}}{\Theta_{\text{выл}}}} = 1,0$, а при $\Theta_X = 10^\circ$

значение $\Delta \sqrt{\frac{\Theta_{X_{\text{выл}}}}{\Theta_X}} = 1,41$, т.е. в начале перехода от полирующего участка к

углу продольного выпуска интенсивность уменьшения радиусов высокая, которая затем постепенно уменьшается к концу угла продольного выпуска и в точке $\Theta_{X_{\text{выл}}} = \Theta_{\text{выл}} = 20^\circ$ становится равной $R_{\text{выл}}$, т.е. $R_{\Pi} = 2,0$. Данная формула противоречит словесному выводу автора.

1.2.4 Калибровка угла поперечного выпуска

Одним из важнейших вопросов калибровки пилигримовых валков является вопрос определения угла поперечного выпуска (ширины) калибра.

Угол поперечного выпуска калибра в различных участках пилигримового валка выполняет различные технологические функции. В участках переменного профиля калибра, особенно в его обжимной части (гребня), угол выпуска должен обеспечивать нормальный захват

гильзы валками, так как чаще всего в первоначальное соприкосновение с металлом входят боковые стороны калибра. Малые значения

углов выпусков приводят к переполнению калибра, а большие – к чрезмерному свободному уширению.

Таким образом, уравнение для определения оптимального значения угла поперечного выпуска должно учитывать максимальное и минимальное значения угла выпуска. Совместное рассмотрение этих двух предельных условий и их усреднение приводят к определению оптимального значения угла выпуска выраженному тригонометрическим уравнением.

П.Т. Емельяненко [4] определение угла поперечного выпуска в каждом сечении калибра сводит к геометрической задаче, которая представлена на рисунке 6.

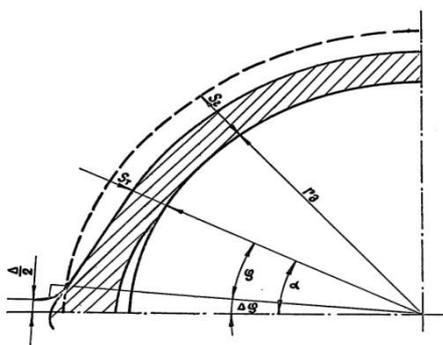


Рисунок 7 - Схема определения угла поперечного выпуска в сечении ($\Theta_{ХГ}$) калибра обжимного участка

Согласно рисунку 7 имеем

$$\alpha = \varphi + \Delta\varphi; \quad \alpha = \arccos\varphi + \arcsin\Delta\varphi;$$

или

$$\alpha = \arccos\frac{r_g + S_{\Gamma}}{r_g + S_{\Gamma}} + \arcsin\frac{0,5\Delta + r}{r_g + S_{\Gamma} + r}; \quad (61)$$

где Δ – зазор между рабочими валками (шпронт);

r – радиус галтели валка.

В начале гребня (в нулевой точке) угол выпуска калибра П.Т. Емельяненко рекомендует проверять на боковой захват гильзы по формуле

$$\alpha \geq \arctg \frac{R_3 R_i (-\cos \Theta_3) \cos \Theta_3}{\left[R_3 - R_i - r_k \cos \Theta_3 \sqrt{R_3^2 - X^2 \cos^2 \Theta_3} \right]}, \quad (62)$$

где

$$X = \frac{R_3 R_i \frac{1 - \cos \Theta_3}{\cos \Theta_3}}{R_3 - R_i - r_k \cos^2 \Theta_3}.$$

Этот метод П.Т. Емельяненко является сложным и недостаточно точным.

П.К. Тетерин [25] предлагает ширину ручья в любом радиальном сечении валка определять по следующей формуле

$$B = H + 2\Delta S, \quad (63)$$

где B – ширина ручья;

H – высота или диаметр ручья.

Величина обжатия стенки $\Delta S = m\mu_{\Sigma} \operatorname{tg} \alpha$. Подставив ΔS в уравнение (100) получим

$$B = H + 2m\mu_{\Sigma X} \operatorname{tg} \alpha, \quad (64)$$

где $\mu_{\Sigma X}$ – суммарный коэффициент вытяжки в сечении X , равный отношению площади поперечного сечения гильзы к площади сечения пилигримовой головки в рассматриваемом сечении.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{R_{\Gamma}} \frac{dR_{\Gamma}}{d\Theta}.$$

С учетом износа ручья валков П.К. Тетерин рекомендует определять ширину калибра по следующей формуле

$$B = H + 2\mu_{\Sigma X} \frac{m}{R_{\Gamma}} \frac{dR_{\Gamma}}{d\Theta_{\Gamma}} + \left(-\sigma \right) \delta, \quad (65)$$

где $\delta = H^1 + H$;

$$\sigma = \frac{B^1 - B}{\delta}.$$

Имея аналитическое выражение профиля гребня валка, по формуле (65) можно рассчитать ширину ручья гребня (бойка) валка, т. к. ширина ручья гребня валка есть величина переменная.

Недостатком данной формулы является то, что по ней определяется ширина калибра, а не угол поперечного выпуска гребня валка, который необходим для расчета копира при обработке углов поперечного выпуска на вальцетокарных станках.

Для начала гребня валков оптимальное значение угла выпуска в неявном виде можно определить выражением, полученным А.А. Чернявским

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\frac{\left(R_i - R_0 \right) \cos \Theta_3}{\operatorname{tg} \alpha_{\Gamma} \sqrt{\left(\frac{\cos \Theta_{\Gamma}}{\operatorname{tg} \alpha_{\Gamma}} \right)^2 + 1}} - \left(R_i - \frac{R_0}{\cos \Theta_3} \right) \cos \alpha_{\Gamma}}{\left(R_i - \frac{R_0}{\cos \Theta_3} \right) \sin \alpha_{\Gamma} + C - \frac{\left(R_i - R_0 \right)}{\cos \Theta_3 \sqrt{\left(\frac{\cos \Theta_3}{\operatorname{tg} \alpha_{\Gamma}} \right)^2 + 1}}}, \quad (66)$$

где φ - угол встречи гильзы и валка при затравочном режиме;

$$C = R_i \frac{1 - \cos \Theta_3}{\cos \Theta_3}.$$

Как видно из уравнения (66), угол поперечного выпуска зависит от размеров валка, условий трения и условий захвата.

Расчет угла поперечного выпуска для начала гребня валка по данной формуле является сложным и зависит от выбора значений параметров φ и f .

Вследствие особенностей пилигримового процесса величина обжатия, а, следовательно, интенсивность деформации изменяются за пилигримовый шаг от максимума на участке гребня до нуля в конце полирующего участка.

Таким образом, в пилигримовых валках из - за указанных выше соображений необходимо применять на участке гребня переменный угол выпуска, изменяющийся от максимума в начале гребня α_{Γ} до минимального значения в начале полирующего участка α_{Π} , в котором он остается постоянным на всей длине последнего.

Определив по формулам (62, 65 и 66) или задавшись максимальным значением угла выпуска α_{Γ} , можно для любого полярного угла $\Theta_{\Gamma X}$ гребня найти по несколько измененной формуле П.Т. Емельяненко [4] расчетный угол выпуска

$$\alpha_X = \alpha_{\Gamma} - \frac{\Delta\alpha}{\Theta_{\Gamma}} \Theta_{\Gamma X}, \quad (67)$$

где α_X - текущее значение угла поперечного выпуска;

α_{Γ} - максимальное значение угла поперечного выпуска в начале гребня валка;

$\Delta\alpha$ - величина разности между максимальным и минимальным значениями углов выпуска или величина коррекции.

Переменный угол поперечного выпуска выполняется на специальных вальцетокарных станках, оснащенных копировальной системой, предназначенной для обработки сложного профиля пилигримового валка.

Угол поперечного выпуска на полирующем участке выбирается из условий практических данных и обычно колеблется в пределах 20 - 25°.

1.2.5 Выводы по первому разделу

1. Теоретическому и экспериментальному исследованию процесса прокатки труб на установках с пилигримовыми станами посвящено значительное количество работ, но в большинстве из них рассмотрены вопросы расчета калибровок валков и совершенствования технологического процесса производства труб без разграничения сортамента на тонкостенные, толстостенные и отношения D/S (геометрических размеров прокатываемого профиля), что не позволяло более полно использовать все возможности пилигримового способа производства труб в части улучшения качественных показателей, расширения сортамента и повышения производительности установок.

2. На основании теоретического анализа и экспериментальных исследований установлено, что максимально возможная величина подачи при увеличении отношения D/S и прочих равных условиях является функцией всей длины и ширины рабочего участка пилигримового валка, а не только угла полирующего участка.

3. Применяемый в настоящее время профиль калибра (круг с тангенциальными выпусками) создает значительную неравномерность обжатия по поперечному сечению гильзы-трубы, особенно при прокатке концом обжимного и началом полирующего участков. Сосредоточение объема металла у вершины калибра и отсутствие обжатия в выпусках при

прокатке тонкостенных труб приводят к разрывам металла, перегрузке механизмов стана и, следовательно, к снижению производительности станов, ухудшению качества и невозможности дальнейшего снижения толщины стенки труб. Установлено, что уменьшения неравномерности деформаций гильзы-трубы в данной зоне можно достичь изменением профиля калибра и введением разгрузочного участка (плавным переходом от бойка к полирующему), на котором должен быть обеспечен заранее заданный режим обжатия, определяемый в зависимости от толщины стенки трубы и отношения D/S , т.е. коэффициента тонкостенности.

4. Проведенный анализ современного состояния способа производства бесшовных труб на трубопрокатных установках с пилигримовыми станами и существующих методов расчета калибровок валков для прокатки тонкостенных и толстостенных труб показал, что для обеспечения (расширения) возрастающих потребностей потребителей в увеличении выпуска экономичных профилей и толстостенных труб специального назначения, необходимо дальнейшее совершенствование калибровок валков и технологического процесса производства бесшовных труб на трубопрокатных установках с пилигримовыми станами.

2 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ТПУ 8-16" ОАО «ЧТПЗ»

2.1 Определение проблемы производства

Производя горячедеформированные бесшовные трубы на ТПУ с пилигримовым станом, завод столкнулся с определённой проблемой, побудившая усовершенствовать технологию производства. Из-за особенностей процесса при прокатке труб диаметром 508-550 мм с толщиной стенки 12-25 мм на существующих валках (с диаметром бочки 1050 мм) не обеспечивалось выполнение требований НД по параметру "кривизна трубы на 1 погонный метр", что привело к необходимости проката труб с

припуском под механическую обработку. Произошёл отказ клиентов от сделок, в связи с высокой стоимостью продукции 508-550 мм с толщиной стенки свыше 20 мм, требующей соответствие по кривизне - дополнительная механическая обработка труб. Раннее бесшовные трубы диаметром 610-630 мм в России не изготавливались и импортировались из стран ближнего и дальнего зарубежья (производились на много затратным методом сверления, трепанации кованых заготовок методом центробежного литья).

2.2 Анализ процесса и оборудования ТПУ 8-16"

Производство горячекатаных бесшовных труб в России в 2014 г. составило 3,325 млн т, в том числе изготовленных на ТПА 8-16" более 250 тыс. т. В 2011 г. на трубопрокатном агрегате с пилигримовым станом ТПА 8-16" Челябинского трубного завода, введенном в строй в 1942 г., была проведена реконструкция подающего аппарата пилигримового стана № 1 с привлечением фирмы «SMS Meer», что позволило выпускать качественные бесшовных горячекатаные трубы широкого сортамента диаметром от 273 до 550 мм с толщиной стенки от 8 до 90 мм.

До настоящего времени трубы диаметром 508, 530 и 550 мм производили с отношением $D/S < 25$, тем более из качественных сталей 08X18H10T-Ш, 10X9MФБ-Ш и 15X5M. На ТПА 8-16" для этого использовали валки с диаметром бочки 1045 мм с калибрами 516, 538 и 562 мм. В валках с диаметром бочки 1045 мм и с врезом в них калибров диаметром 538 и 562 мм прокатать качественные трубы по геометрическим размерам проблематично, а трубы, диаметром 610 и 630 мм — вообще невозможно. Трубы диаметром 530 мм с толщиной стенки от 12 до 17 мм и диаметром 550 мм с толщиной стенки до 25 мм из сталей 08X18H10T-Ш, 10X9MФБ-Ш и 15X5M производили по технологии: прокатка передельных труб с припуском по диаметру и толщине стенки на 15 - 18 мм с последующей механической обработкой — расточкой и обточкой на заданный размер. Лучшие результаты по расходу металла при прокатке механически обработанных

товарных груб по ТУ 14-ЗР-62—2002 получены при прокатке передельных груб на ТПА 8-16» с пилигримовым станом из заготовок размером 630 x 100 x 1200 ± 25 и 650 x 100 x 1240 мм. Средняя длина груб размером 530 x 12 мм при прокатке передельных труб из заготовок данного размера возрастает от 29,0 до 31,0 %, при прокатке труб размером 530 x 16 мм — только на 4,0 — 5,0 %, а расходный коэффициент металла снижается от 200 до 500 кг на тонну труб.

В настоящее время появилась потребность в производстве горячекатаных бесшовных груб типоразмера 508 — 630 x 10-32 мм из сталей 09Г2С, 15Х5М, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф для нефтеперерабатывающей, котельной, газовой и атомной промышленности России. Так, для трубопроводов низкого давления 2-го класса безопасности группы В атомных станций потребовались бесшовные трубы типоразмера 377 x 8 - 18; 426 x 8 - 25; 530 x 8 - 28; 610x10-32; 630 x 12 - 36 мм из стали 08Х18ПТ-Ш по ТУ 14-ЗР-197-2001, которые до настоящего времени в России не производили.

Для производства труб типоразмера 530 x 8 - 28 мм из стали 08Х18Н10Т - Ш, 10Х9МФБ-Ш и 15Х5М на ТПА 8-16" разработана принципиально новая технология, которая включает следующие стадии: отливку слитков ЭШП размером 610 x 1725 ± 25 мм, обточку слитков в слитки-заготовки диам. 590 ± 5 мм —> сверление в слитках-заготовках отверстия диам. 100 ± 5 мм —> нагрев слитков-заготовок до температуры пластичности (в зависимости от марки стали или сплава) —> прошивку слитков-заготовок на стане поперечно-винтовой прокатки на оправке диам. 260 ± 10 мм в гильзы-заготовки длиной $L_r < 2000$ мм с подъемом по диаметру не более 2,0 % —> повторный нагрев гильз-заготовок с холодного или горячего посада до температуры пластичности —> вторичную прошивку-раскатку гильз-заготовок с подъемом или посадом по диаметру не более 5,0% на оправке диам. $D_{прт} \pm 15-20$ мм -► прокатку труб на пилигримовом стане.

Для прокатки качественных товарных труб диам. 508, 530 и 550 мм с толщиной стенки от 12 до 25 мм, исключения из технологического процесса механической обработки передельных труб разработаны калибровки валков пилигримового стана. Существующая калибровка валков содержит по окружности бочки диаметром 1045 мм ручей круглого сечения с тангенциальными выпусками, на котором последовательно расположены боек, с калиброванный по схеме тупой — острый — тупой.

Для прокатки тонкостенных труб диаметром 508 мм предложена калибровка валков с диаметром бочки 1150 мм. Плавно снижающиеся от 35° до 23° углы поперечного выпуска на участке бойка от нулевой точки до центрального угла, равного 20° , выполнены постоянными и равными 35% на участке бойка 70' с переходом на полирующий участок с центральным углом 10° . Для прокатки труб диаметром 530 и 550 мм предложена калибровка, в которой бочка валка выполнена также диаметром 1150 мм и содержит ручей круглого сечения с тангенциальными выпусками, длина которого составлена из последовательно расположенных бойка с центральным углом 80° , полирующего участка с центральным углом 90° , угла продольного выпуска с центральным углом 40° и холостого участка с центральным углом 150° .

Прокатку труб диаметром 610 и 630 мм с толщиной стенки от 25 до 60 мм на ТПА 8-16" ОАО ЧТПЗ можно проводить только из полых слитков-заготовок ЭШП размером 720 х вн. 540 — 610 х 3200 мм, так как в существующую клеть пилигримового стана можно задать гильзу или полый слиток-заготовку диаметром до 720 мм. На существующем стане поперечно-винтовой прокатки можно прошить гильзу диаметром не более 690 мм. Так как процесс прокатки на пилигримовом стане происходит с обжатием по диаметру A от 12,5 до 15,3% и коэффициентами вытяжки c от 1,61 до 3,02 в зависимости от толщины стенки труб, то для прокатки труб данного размера разработана специальная калибровка, отличающаяся тем, что протяженность

бойка составляет 0,57 — 0,58, полирующего участка 0,28 — 0,29, а угла продольного выпуска 0,14 — 0,15 от общей протяженности рабочей части валка. Боек валка с центральным углом 120° и общим обжатием-редуцированием полых слитков-заготовок по диаметру от 80 до 100 мм (в среднем 90 мм) по окружности бочки содержит ручей с поперечными выпусками, уменьшающимися от 37° до 22° и плавным распределением обжатия заготовки по диаметру.

Результаты прокатки труб размером 530 x 17 мм из стали 15ГС по ТУ 14-3Р-55—2001 на новой калибровке валков пилигримового стана 14) показали, что поперечная разностейность труб не превышает $+12,5/-5,0\%$, продольная $-15,0/-5,0\%$ (по ГУ $+20,0/-5,0\%$). Максимальная кривизна труб на погонный метр (бугристость) составила от 1,7 до 2,0 мм (по ТУ не более 2,0 мм), т. е. трубы полностью отвечали требованиям ТУ.

Средняя длина труб этого размера на сдаче, прокатанных из заготовок размером 630 x 100 x 1700 мм, составила 6,86 м, а расходный коэффициент металла 1,285. При прокатке данного размера труб в валках с

диаметром бочки 1045 мм средняя длина труб на сдаче составила 4,87 м, а расходный коэффициент металла 1,811. Длина труб, прокатанных в валках опытной калибровки, возросла в 1,41 раза. При прокатке труб данного размера в валках с диаметром бочки 1045 мм на существующей калибровке валков получен повышенный расходный коэффициент металла из-за брака труб по толщине стенки и кривизне (повышенная поперечная и продольная разностенность). В порядке эксперимента трубы данного размера были прокатаны в валках с диаметром бочки 1150 мм, изготовленных по существующей калибровке (угол поперечного выпуска на бойке 33° ; на полирующем участке 20° ; на угле продольного выпуска угол поперечного выпуска возрастал с 20° до 33° ; угол поперечного выпуска на холостом участке 33°). В таких валках было прокатано 20 труб. Расходный коэффициент металла составил 1,371, что значительно ниже, чем при

прокатке труб в валках с диаметром бочки 1045 мм и выше, чем при прокатке в валках с диаметром бочки 1150 мм, с калиброванных по предлагаемой методике. По сравнению с существующей технологией (числитель) снижение расхода металла по предлагаемой технологии (знаменатель) составило:

Размер труб, мм	Сталь	Расходный коэффициент металла	Снижение расхода металла на 1 т труб, кг
508 × 15	09Г2С	1,588/1,233	355
508 × 18	15ГС	1,664/1,291	373
508 × 18	15ГС	1,587/1,340	247
508 × 22	12Х1МФ	1,371/1,291	80
530 × 17	15ГС	1,811/1,285	526
530 × 17*	15ГС	1,371	—
530 × 20	12Х1МФ	1,512/1,358	127
530 × 25	09Г2С	1,727/1,380	347
530 × 25	15Х5М	1,735/1,370	365
530 × 32	15Х1М1Ф	1,617/1,404	213
550 × 32	12Х1МФ	1,703/1,405	298
550 × 40	15Х1М1Ф	1,666/1,433	233

Рисунок 8 - Опытная прокатка 20 труб в валках существующей калибровки с диаметром бочки 1150 мм

Из этих данных видно, что расход металла по трубам всех размеров и марок сталей, прокатанных в валках с диаметром бочки 1150 мм, скалиброванных по предлагаемым методикам, снижен на 213-526 кг на каждой тонне товарных труб.

3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РАСКАТКИ ТРУБ

3.1 Расчет таблицы прокатки для производства труб размером 610x40 мм на ТПУ8-16" ОАО "ЧТПЗ" из заготовок размером 610x100x1400 мм и из полых слитков заготовок ЭШП размером 720xвн.560x3300 мм.

1. Диаметр горячих труб после пилигримового стана 616-618 мм.

2. Определяем диаметр дорна для прокатки труб размером 610x40 мм

$$D_r - 2S, \quad (68)$$

где D_r – диаметр труб в горячем состоянии = 616-618 мм;

S – толщина стенки труб 39-41 мм.

$$(616-618) \text{ мм} - (78-82) \text{ мм} = 538/536 \text{ мм.}$$

Для того чтобы труба сходила с дорна должен быть зазор между дорном и диаметром гильзы, равным 1-2 мм, который обеспечивается за счет поперечных выпусков пилигримовых валков.

Диаметр дорнов примем равным 535/537 мм.

3. Заготовки размером 630x100x1400 мм нагреваем до температуры пластичности, которая зависит от марки стали. Для стали марки 20 – 1270-1280 °C.

4. Определяем размер гильз-заготовок по формуле

$$L_{г.з.} = L_з \mu_p, \quad (69)$$

где μ_p = коэффициент вытяжки при прошивке-раскатке заготовок в стане поперечно-винтовой прокатки, определяемый по формуле

$$\mu_{п.} = \frac{(D_з - S_з) S_з K}{(D_{г.з.} - S_{г.з.})} = \frac{(630 - 265) 265 \times 0,97}{(660 - 147,5) 147,5} = 1,27,$$

где $D_з$ - диаметр заготовки, мм;

$S_з$ - толщина стенки заготовки, мм;

$K = 0,97$ - коэффициент, учитывающий угар металла при нагреве заготовок в методической печи;

$D_{г.з.}$ - диаметр гильзы-заготовки при прошивке заготовок в стане поперечно-винтовой прокатки на оправке диаметром 350 мм с подъемом по диаметру $\delta_{п.} = 4,76$ %;

$S_{г.з.}$ - толщина стенки гильзы – заготовки, мм.

Тогда размер гильзы-заготовки составит 660xвн.365x1780 мм.

Максимальная длина заготовок и гильз-заготовок не должна превышать 2000 мм, которую можно задать в стан поперечно-винтовой

прокатки (прошивной). Максимальную длину гильзы которую можно выдать из стана диаметром не более 690 мм и длиной не более 3600 мм. Максимальную длину гильзы, которую можно прокатать на существующем пилигримовом стане не более 3400 мм.

Гильзы-заготовки нагреваются в методической печи до температуры пластичности и прошиваем-раскатываем в стане поперечно-винтовой прокатки на оправке диаметром 550 мм с подъемом по диаметру $\delta_p = 4,55\%$ в гильзы размером с коэффициентом вытяжки

$$\mu_p = \frac{(660 - 147,5)147,5 \times 0,97}{(690 - 62,5)62,5} = 1,87,$$

где $D_{г.з.}$ - диаметр гильзы-заготовки, мм;

$S_{г.з.}$ - толщина стенки гильзы-заготовки, мм;

$D_{г.}$ - диаметр гильзы, мм;

$S_{г.}$ - толщина стенки гильзы, мм

Таким образом, размер гильзы составит 690хвн.565х3300 мм.

Из гильзы размером 690хвн.565х3300 мм на дорне диаметром 535/537 мм на пилигримовом стане прокатываем трубы размером

$$690 \times \text{вн.} 565 \times 3300 \times \mu_{п.п.} - L_{т.0.} = 3300 \times 1,72 - 1200 = 4480 \text{ мм.}$$

$$\mu_{п.п.} = \frac{(D_{г.} - S_{г.})S_{г.}}{(D_{т.} - S_{т.})S_{т.}} = \frac{(690 - 62,5)62,5}{(610 - 40)40} = 1,72,$$

где $D_{т.}$ - диаметр трубы, мм;

$S_{т.}$ - толщина стенки трубы, мм.

Прокатку труб данного размера лучше производить из полых слитков-заготовок размером 720хвн.560х3200 мм.

$$\mu_{п.п.} = \frac{(720 - 80)80}{(610 \times 40)40} = 2,25.$$

Размер трубы на прокатке составит

$$L_{т.} = 3300 \times 2,25 - 1200 = 6200 \text{ мм.}$$

Трубы диаметром 610 и 630 мм на ТПУ 8-16" с пилигримовыми станами катаем в калибрах 618 и 640 мм, врезанных в валки с диаметром бочки 1150 мм.

Определение основных размеров рабочих валков пилигримовых станов (для ТПА 8-16"):

Идеальный диаметр валка D_i , мм:

$$D_i = 1,35D_{tmax} + 550 \quad (70)$$

$$D_i = 1,35 \cdot 610 + 550 = 1374 \text{ мм}$$

Диаметр бочки валка D_6 , мм:

$$D_6 = D_i - \Delta, \quad (71)$$

где Δ - зазор между валками, для установки 8-16" - $25 \div 30$ мм

$$D_6 = 1374 - 25 = 1349 \text{ мм}$$

Длина бочки валка L_6 , мм:

b_0 ,

(72)

где Δ' - зазор между гильзой и калибром в холостой части валка, равный 30-40 мм; α_B - угол выпуска поперечного сечения калибра в холостой части валка, равный 28-37°; b_0 - ширина реборды 15-20 мм.

$$\cdot 15 =$$

Принимаем $L_6 = 896$ мм

3.2 Расчет таблицы прокатки для производства труб размером 630x30 мм на ТПУ8-16" ОАО "ЧТПЗ" из полых слитков - заготовок ЭШП размером 720xвн.600x3300 мм.

$$\mu_{п.п.} = \frac{(720 - 60)60 \times 0,97}{(630 - 30)30} = 2,13.$$

$$L_{т.} = 3300 \times 2,13 - 1500 = 5530 \text{ мм.}$$

Полые слитки – заготовки размером 720хвн.600х3300 мм нагреваем до температуры пластичности и прокатываем на пилигримовом стане на дорнах диаметром 575/577 мм в трубы размером 630х30х5530 мм.

4 РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ТРУБ

Ввиду высокого РК для труб 508-530 мм и длительных сроков изготовления т/ст. труб из-за дополнительных механических операций, впоследствии были разработаны не только новые предложения по совершенствованию раскатки труб, но и новые виды продукции (горячекатаные бесшовные трубы размером 508х10-15 мм, 530х12-32 мм, 550х15-40 мм, 610х25-60 мм, 360х25-60 мм).

Ниже представлены некоторые предложения по совершенствованию бесшовных труб:

- 1) Освоить производство в цехе №1 ОАО "ЧТПЗ" на пилигримовом стане с диаметром бочки вала 1150 мм бесшовные горячедеформированные трубы диаметром 508-630 мм.
- 2) Сократить производственные издержки на производство бесшовных горячедеформированных труб большого диаметра 508-550 мм - уменьшение расхода металла (расходного коэффициента) при производстве 1 тонны готовой продукции.
- 3) Снизить сроки производства труб большого диаметра 508-550 мм.
- 4) Достигнуть показателей качества бесшовной трубы большого диаметра 508-630 мм согласно ТУ 14-ЗР-55-2001, ТУ 14-ЗР-62-2002, ТУ 14-ЗР-51(50)-2001.

- 5) Разработать калибровки валков пилигримового стана с диаметром бочки 1150 мм для производства труб 508-630
- 6) Разработать временные технологические инструкции (технические задания) на изготовление бесшовных труб большого диаметра (508-630мм).
- 7) Подготовить прокатный инструмент согласно разработанным калибровкам и временным технологическим инструкциям (ТЗ) для производства труб 508-630 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Пилигримовый способ производства бесшовных горячекатаных товарных и передельных труб диаметрами 426,465,530,610 и 630 мм из труднодеформируемых сталей и сплавов на данный момент является безальтернативным, конкурирует и будет успешно конкурировать с другими способами производства труб данного сортамента.

2. Применяемый в настоящее время профиль калибра (круг с тангенциальными выпусками) создает значительную неравномерность обжатия по поперечному сечению гильзы-трубы: максимальную деформацию металла у вершины калибра и отсутствие обжатия в выпусках, что приводит к разрывам металла при прокатке тонкостенных труб, а также к перегрузке механизмов стана, а следовательно, к снижению величины подачи гильзы в очаг деформации и производительности станов.

3. Разработаны новые калибровки валков и режимы прокатки в валках с диаметром бочки 1150 мм в калибрах 442 и 560 мм пилигримового стана, на котором впервые в мировой практике прокатаны передельные трубы из слитков-заготовок ЭШП стали 08X18N10T-Ш с последующей механической обработкой - расточкой и обточкой их в товарные трубы размером 426 x 25, 530 x 10, 530 x 14, 530 x 16, 530 x 25, 530 x 28, 630 x 14, 630 x 16, 630 x 25 и 630 x 35 мм по ТУ 14-ЗР-197-2001 и изделия (тройники, отводы) для атомной промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.В. Сафьянов. Перспективы развития и совершенствования производства горячекатаных труб на трубопрокатных агрегатах с пилигримовыми станами, современное состояние и техническое перевооружение ТПА 8-16" ОАО "ЧТПЗ". // Достижения в теории и практике трубного производства. Екатеринбург. 2004. с. 284 – 287.
2. Г. Эверсберг. Горячее пильгерование. Перспективы на будущее. // Доклад на симпозиуме, проводимый фирмой "Маннесман – Демаг" ФРГ и В/О "Внешторгреклама" с участием советских специалистов, посвященный горячей пилигримовой прокатке труб. Москва. Октябрь 1986г.
3. А.В. Сафьянов, Н.П. Карпенко, Ю.А. Медников, А.А. Фёдоров, Л.И. Лапин. // Сталь. 1997. №9. с. 38-39
4. П.Т. Емельяненко.// Теория кривой и пилигримовой прокатки. Москва. Изд-во "Металлургия". 1949.
5. А.И. Целиков, А.Н. Ирошников.// Сталь. 1940 (специальный выпуск). с. 21-24.
6. П.Т. Емельяненко.// Теория и практика металлургии. 1940. №3. с.14-16.
7. А.И. Целиков.// Прокатные станы. Москва. Изд-во "Металлургия". 1946.
8. О.А. Пляцковский.// Теория прокатки. Москва. Изд-во "Металлургия". 1962. с. 412-430.
9. П.К. Тетерин. // Сталь. 1951. №3. с. 244 – 252.
10. О.А. Пляцковский, Ю.М. Матвеев и др.// Сталь. 1951. №3. с.252-259.
11. Ю.М. Матвеев и Я.Л. Ваткин.// Калибровка валков и инструмента трубных станов. Москва. Издательство "Металлургия". 1951.

12. Л.А. Вербицкий.// Сталь. 1934. №4. с. 258-261.
13. И.А. Фомичев, В.И. Девятисильный.// Сб. УкрНИТИ. изд-во “Металлургия”. 1964. выпуск №4.
14. Е.А. Писаненко. // Теория и практика металлургии, 1938. №1. с. 29-32.
15. В.С. Рудой, А.А. Чернявский и др.// Сб. ВНИТИ, изд-во “Металлургия”. 1965. №13.
16. Ю.М. Матвеев и др.// Прокатное производство. Москва. издательство “Металлургия”. 1968.
17. Ю.Ф. Шевакин, Б.Н. Матвеев и др. // Сталь. 1970. №1. с. 57-59.
18. Ю.Ф. Шевакин. // Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. Москва. изд-во “Металлургия”. 1963.
19. Авт. свид. СССР № 180159./О.А. Пляцковский.// Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1966. №7.
20. О.А. Пляцковский и др. // Сталь. 1968. №5. с. 445 – 447.
21. Авт. свид. СССР № 246459./ О.А. Пляцковский, В.И. Девятисильный, А.В. Сафьянов и др.// Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1969. №21.
22. О.А. Пляцковский, В.И. Девятисильный, А.В. Сафьянов и др. // Металлург. 1969. №2. с. 27-29.
23. А.В. Подлозный, Б.Н. Матвеев, А.Д. Терещенко.// Сб. “Обработка металлов давлением” (ВЗМИ). Москва. 1971.
24. Авт. свидетельство СССР №554019. Валок пилигримового стана. / В.В. Ериклинцев, И.Ф. Хайдуков, А.В. Сафьянов и др.// Открытия. Изобретения. 1977. №14.
25. П.К. Тетерин. Прокатное и трубное производство.// Приложение к журналу “Сталь”. Металлургиздат. 1958. с. 227-242.
26. Ю.Ф. Шевакин, А.З. Глейберг. // Производство труб. Москва. изд-во “Металлургия”. 1968.

27. О.А. Пляцковский, А.А. Чернявский. // Известия высших учебных заведений. 1959. №10. с. 43-48.
28. Ю.М. Матвеев, М.А. Шубик. // Бюллетень ЦИИН ЧМ. 1959. №17. с. 24-29.
29. П.К. Тетерин.// Теория поперечно-винтовой прокатки. Москва.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1 - прокатка труб диаметром 610 мм

Номинальные размеры труб			Размеры слитка (заготовки)					Размеры инструмента и гильзы при прошивке заготовок на прошивном стане					Размеры инструмента и труб при прокатке на пилгримовом стане								Предельные размеры труб в холодном состоянии						
Наруж. диам. мм	Толщина стенки. мм	Теоретическая масса трубы. кг	Наружн диаметр мин. мм	Наружн. диаметр макс.мм.	Диаметр сверлен. мм.	Длина. мм	Теорет. масса. кг	Диаметр оправки. мм.	Размеры гильзы				Размер калибра вальцов. мм	Диам. дорна	Размеры труб в горячем состоянии							Кэфф. вытяжки	Общий коэфф вытяжки	Диаметр мин. мм	Диаметр макс.мм	Толщина стенки мин. мм	Толщина стенки макс. мм
									Наруж. диаметр. мм	Внутр. диаметр.мм	Длина. м.	Кэффр. Вытяжки			Передний конец. мм	Задний конец. мм	Диаметр труб мин..мм.	Диаметр труб макс..мм	Толщина стенки мин..мм	Толщина стенки макс..мм	Ориент. длина.м.						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Слиток 17 дюймов																											
610	60	813.8	600	615	0	1850	4030	350	660	365	2.1	1.28															
								520	700	535	3.0	1.48	618	494	495	615	617	59.5	61.0	3.9	1.52	2.26	602.4	617.6	52.5	67.5	
610	50	690.5	600	615	0	1850	4030	375	650	390	2.3	1.36															
								540	700	555	3.4	1.49	618	513	515	615	617	49.5	51.0	4.7	1.60	2.38	602.4	617.6	43.8	56.3	
610	45	627.0	600	615	0	1850	4030	375	650	390	2.3	1.36															
								540	700	555	3.4	1.49	618	523	525	615	617	44.5	46.0	5.2	1.76	2.62	602.4	617.6	39.4	50.6	
Поковка 630 мм																											
610	60	813.8	630	630	100	1630	3888	350	660	365	2.0	1.28															
								520	700	535	2.9	1.48	618	494	495	615	617	59.5	61.0	3.7	1.52	2.26	602.4	617.6	52.5	67.5	
610	50	690.5	630	630	100	1630	3888	375	660	390	2.2	1.36															
								540	700	555	3.3	1.56	618	513	515	615	617	49.5	51.0	4.5	1.60	2.49	602.4	617.6	43.8	56.3	
610	45	627.0	630	630	100	1630	3888	375	660	390	2.2	1.36															
								540	700	555	3.3	1.56	618	523	525	615	617	44.5	46.0	5.0	1.76	2.75	602.4	617.6	39.4	50.6	