Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт

Факультет материаловедения и металлургических технологий
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой

_____ /Радионова Л.В./

_____ 2020 г.

# *РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ НА РЕВЕРСИВНОМ СТАНЕ КВАРТО 1700 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПОЛОС*

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА

*ЮУрГУ – 22.03.02 – 2020 – 309-03-089 – 00.00.00 ПЗ*

Нормоконтролер

_____ *д.т.н., профессор*

*Чаплыгин Борис Александрович*
_____ 2020 г.

Руководитель работы

_____*д.т.н., профессор*

*Чаплыгин Борис Александрович*
_____ 2020 г.

Автор работы
студент группы *П-438*

_____

*Сухарев Кирилл Ильич*
_____ 2020 г.

Челябинск
2020

# АННОТАЦИЯ

Сухарев К.И. Разработка мероприятий на реверсивном стане кварто 1700 для повышения качества холоднокатаных полос – Челябинск: ЮУрГУ, ПИ, МиМТ, 2020. – 44 с., 15 ил., 10 табл., библиогр. список – 12 наим., 3 приложения.

В данной работе рассмотрены виды и причины возникновения неплоскостности.

После анализа существующих способов и устройств для управления плоскостностью полос при холодной прокатке предложена гибкая технология для реверсивного четырехвалкового стана, позволяющая реализовать различные варианты процессов прокатки в каждом проходе и обеспечить плоскостность холоднокатаных полос.

Разработаны схемы прокатки с назначением вида процесса в каждом проходе. Рассчитаны энергосиловые параметры симметричной прокатки, асимметричной прокатки и процесса прокатки- волочения, с целью оценки влияния разных процессов прокатки на давление и, как следствие, на деформацию валкового узла.

Предложена структура главной линии стана для обеспечения протекания процесса прокатки в режиме заданных скоростей концов полосы, который осуществляется с помощью натяжных станций.

Предложено решение по системе автоматического регулирования плоскостности.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ПРИЧИНЫ НЕПЛОСКОСТНОСТИ ..... 5

*1.1. Виды неплоскостности* ..... 5

*1.2. Анализ технологического процесса и оборудования реверсивного стана 1700* ..... 9

*1.3. Установленные стандарты для холоднокатаных полос* ..... 11

*1.4. Анализ поведения валкового узла* ..... 11

2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ НАГРУЗКИ НА ВАЛКОВЫЙ УЗЕЛ ПРИ РАЗНЫХ КИНЕМАТИЧКЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ..... 18

*2.1.Расчет усилий прокатки* ..... 18

*2.2. Анализ поведения валкого узла* ..... 28

*2.4. Расчет моментов и мощности* ..... 32

3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ГЛАВНОЙ ЛИНИИ СТАНА ..... 37

*3.1. Обоснование реконструкции главной линии стана* ..... 37

4. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЛОСКОСТНОСТИ ПОЛОСЫ ..... 37

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 40

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ..... 41

# ВВЕДЕНИЕ

Прокатное производство является одной из отраслей промышленности страны, определяющей ее экономический потенциал.

Прокатка получила наибольшее распространение среди остальных способов обработки металлов давлением благодаря непрерывности процесса, высокой производительности и возможности получения широкого спектра сортамента высокого качества.

В период замедления мировой экономики ведущие производители металлопродукции: Китай, Япония, Индия, США, Россия и другие, не инвестируют в строительство новых станов, а инвестируют в модернизацию, которая обеспечивает лучшее качество готовой продукции, загрузку предприятий и снижение операционных затрат.

Сегодня это основная тенденция в России, так как большие металлургические предприятия со старыми мощностями, оставшимися ещё с советских времен, именно за счет модернизации мощностей обеспечивают свою конкурентоспособность.

Тем более что в последние годы активизировалась борьба за качество готовой продукции, расширение её сортамента, а это предполагает совершенствование технологии прокатки полос и конструкции станов, а так же их автоматизация.

Как никогда актуальным становится вопрос клиентоориентированности, когда нельзя взять заказ и не выполнить его, в то же время нельзя говорить заказчику, что крупные и поэтому выгодные заказы от него будут допускаться в работу, а мелкие и специфические- нет. Именно поэтому в настоящее время использование реверсивных станов кварто 1200, 1600, 1700 является востребованным. Станы кварто 1700 массово выпускались УЗТМ в 1960- 1980 гг. и до сих пор эксплуатируются на ЧерМК, НЛМК, ЕВРАЗ. Поэтому совершенствование технологии

прокатки полос, реконструкция станов данного типа является востребованной задачей.

Модернизация позволит устаревшему оборудованию соответствовать растущим требованиям рынка, включающих в себя повышение качества, производительности, расширение ассортимента продукции и снижение эксплуатационных расходов [1].

Основные тенденции развития оборудования и технологии:

- Минимизация простоя оборудования

- Расширение ассортимента продукции

- Улучшение планшетности и повышение точности готовых полос

- Увеличение производительности

- Повышение экономичности

В связи с этим в настоящее время проводится компьютеризация производств. Цифровые технологии позволяют минимизировать простой оборудования, расширить ассортимент продукции, снизить затраты на электроэнергию, стоимость которой при производстве стали составляет около 40% от стоимости всех производственных расходов, а так же повысить точность толщины и улучшить планшетность полос.

# 1. ПРИЧИНЫ НЕПЛОСКОСТНОСТИ

## *1.1. Виды неплоскостности*

При прокатке имеют место быть дефекты листа, полосы или ленты в виде отклонений от плоской формы по их длине или ширине. Рассмотрим основные их виды и причины образования.

Существует огромное количество разновидностей брака листового проката. Но одно из самых важных мест среди геометрических характеристик занимает поперечный профиль и плоскостность

холоднокатаных полос. Прокат с несоответствующими нормам геометрическими показателями затрудняет, а иногда делает невозможным его дальнейшую обработку на линиях нанесения покрытия, штамповки и перекатывания на другие размеры.

По последним данным в листопрокатных цехах выпуск несоответствующей по плоскостности и профилю продукции достигает 0,5% от общего объема производства.

Рассмотрим основные виды неплоскостности полос [2-3]:

“Волнистость” Отклонение от плоскостности, при котором поверхность металлопродукции или её отдельные части имеют вид чередующихся выпуклостей и вогнутостей, непредусмотренных формой проката.

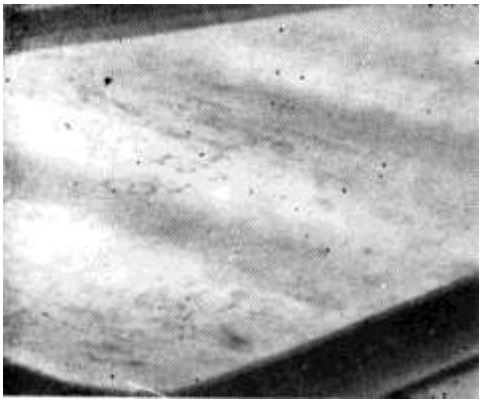

Рисунок 1- дефект “Волнистость”

Причины образования:

1. Может возникнуть при неравномерном распределение давлений при прокатке (например, смещенные подшипники).
2. Смещение заготовки по ходу прокатки, особенно в последних проходах.
3. Неправильная геометрия очага деформации (например, односторонняя настройка валков, недостаточная чистота поверхности валков).

“Коробоватость” Разновидность волнистости или вогнусти имеющая локальный характер.

Рисунок 2- дефект “Коробоватость”

“Плена” Дефект металла, представляющий собой отслоение металла языкообразной формы, которое соединенное с основным металлом одной стороной и ориентировано в направлении прокатки. Дефект может сопровождаться разрывами металла. В зоне дефекта может присутствовать небольшое обезуглероживание.

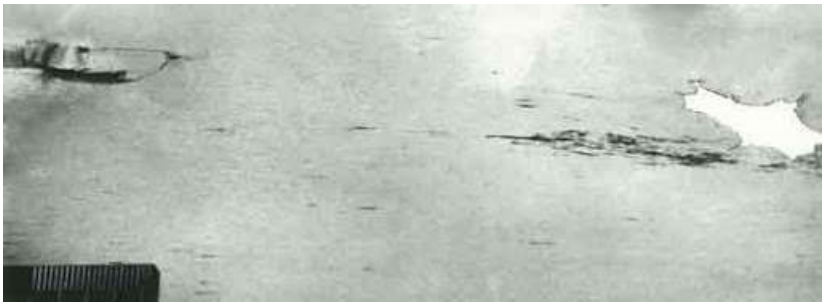

Рисунок 3- дефект “Плена”

Причины образования:

1. Сверхнормативная выработка валков или их травмированность, приводящая к образованию на металле выступов, которые при дальнейшей прокатке раскатываются в плены.
2. Некачественная огневая зачистка подката (дефект особенно часто возникает на металле со следами глубокой зачистки или в местах зачистки поверхностного дефекта).

3. Грубое механическое травмирование полос при прокатке или в процессе травления.

Способы управления плоскостностью полос при прокате [4]:

Практика производства листового проката позволяет выделить следующие общепризнанные способы воздействия на форму поперечного сечения полосы:

— станочная профилировка валков;

— принудительный изгиб валков;

Имеются и другие причины образования дефектов, а так же известные методы их предотвращения, показанные на рисунке 4, в частности: тепловое регулирование; осевое смещение валков; перекрещивание валков; регулирование при помощи валков с изменяемым профилем бочки.

Принудительный изгиб валков применяют для регулирования симметричных искажений плоскостности. Это один из наиболее распространенных способов регулирования профиля и плоскостности листового проката. В этом способе можно выделить вариант регулирования в вертикальной и в горизонтальной плоскостях.

В клетях кварто чаще всего осуществляют противоизгиб и дополнительный изгиб рабочих валков, прилагая вертикальные усилия непосредственно к подушкам валков при помощи гидроцилиндров.

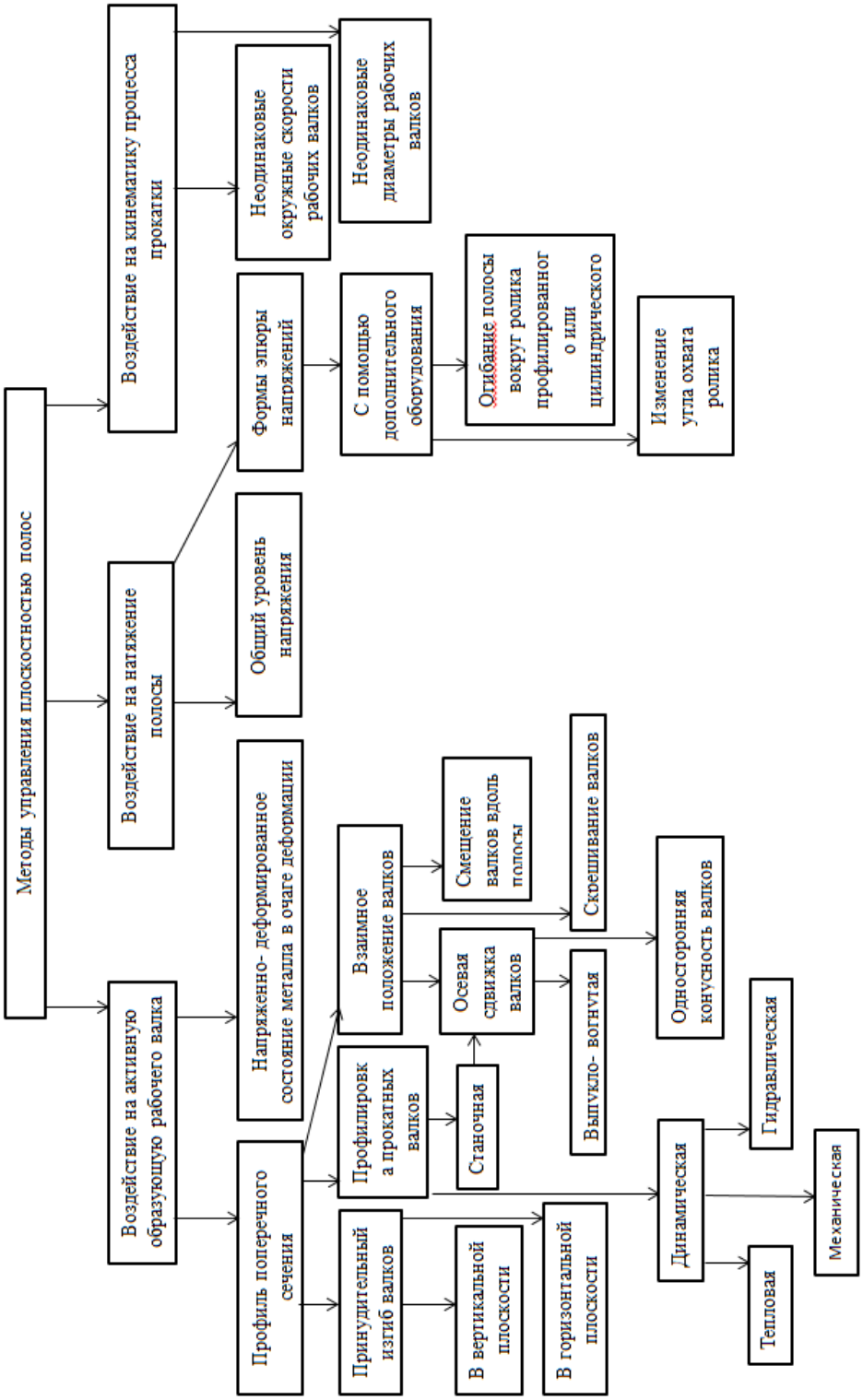


Рисунок 4- Методы управления плоскостностью полос

*1.2. Анализ технологического процесса и оборудования реверсивного стана 1700*

Реверсивный стан кварто 1700 предназначен для холодной прокатки горячекатаных термообработанных травленых и холоднокатаных термообработанных полос, а так же для дрессировки холоднокатаных термообработанных полос в рулонах [5-6].

Размеры рулонов:

Ширина от 1000 мм до 1500 мм

Внутренний диаметр- 750 мм

Наружный диаметр от 800 мм до 1800 мм

Масса рулона от 2 т. до 15 т.

Толщина подката:

Горячекатаного- от 3мм до 6 мм

Холоднокатаного- от 0,8 мм до 2,5 мм

Толщина полос после прокатки- от 0,5 мм до 3,2 мм

Подкат и холоднокатаный металл после прокатки должен соответствовать требованиям ГОСТ 5632, 5582, 7350, 19904, 19903 и действующих технических условий [7].

Технологический процесс прокатки холоднокатаной полосы

После термообработки, травления и листоотделки горячекатаный либо холоднокатаный подкат подается на стан Кварто 1700, где производится прокатка и дрессировка до нужного размера и структуры поверхности [7].

Исходные рулоны подаются на передаточных тележках и мостовых кранах в сортовой пролёт, где передаются на приёмный цепной транспортёр.

Прокатка производится за несколько пропусков с передним и задним натяжением полосы, которое обеспечивается за счет установленных натяжных устройств перед станом и за ним. После прокатки до требуемой толщины полосы, смотанной на барабан моталки, последняя разворачивается на 180 градусов, при этом в свободный барабан моталки устанавливается следующий прокатываемый рулон.

Перемотка прокатанной полосы на моталку и прокатка следующего рулона- независимые друг от друга процессы. Перемотанная в рулон полоса снимается с моталки и перемещается на отводящий конвейер, упаковывается, маркируется после чего электромостовым краном передается на склад.

*1.3. Установленные стандарты для холоднокатаных полос*

Технологический режим станов “Кварто” для холодной прокатки разрабатывают, основываясь на требованиях, приведенных в технических условиях для каждого вида готовой холоднокатаной полосы, входящих в сортамент цеха.

В таблице указаны характеристики относительной поперечной разнотолщинности полос, прокатанных на стане Кварто 1700 [7].

Таблица 1- Значения относительной поперечной разнотолщинности полос по ГОСТ или ТУ.

| Размеры полос | k, мм |
|---|---|
| 0,5- 0,8х 1000 | 0,015 |
| 1,0х 1000 | 0,012 |
| 1,4-1,5х 1000 | 0,014 |
| 2,0х 1000 | 0,015 |
| 2,5х 1000 | 0,024 |

*1.4. Анализ поведения валкового узла*

Под действием усилия прокатки валковая система прокатного стана может изгибаться и сплющиваться, вследствие чего изменяется форма очага деформации. В процессе прокатки этот показатель является одним из ключевых для получения необходимой плоскостности листа или полосы.

Для условия равномерного распределения межвалкового давления в стане кварто и при постоянстве погонного давления по ширине полосы используется методика А.И. Целикова (формула (1)) / [7-8]

$$f = \frac{P}{384 \cdot E \cdot J_c} \cdot \left(12 \cdot a \cdot b^2 - 7 \cdot b^3\right) + \frac{1,2 \cdot P}{8 \cdot G \cdot F_c} \cdot b \qquad (1)$$

Где $h_1$ – высота полосы после прохода, мм;

a- Расстояние по осям нажимных винтов (a= 2940 мм);

b- Ширина полосы, мм;

E-модуль упругости материала валков (E= 2,15*$10^5$ Н $*$ мм);

G- Модуль сдвига материала валка (G= 0,82* $10^5$ Н $*$ мм$^2$).

При пренебрежении профилировкой рабочих валков необходимо обеспечить:

$$f_i = \frac{k \cdot h_{li}}{2}, \tag{2}$$

По формуле (1) определим оптимальное усилие изгиба валков системы, соответствующее усилию прокатки:

$$P_{опт} = \frac{2 \cdot h_{li} \cdot k}{\frac{12 \cdot a \cdot b^2 - 7 \cdot b^2}{384 \cdot E \cdot J_c} + \frac{1,2 \cdot b}{8 \cdot G \cdot F_c}}. \tag{3}$$

Где k= $\frac{\delta h_l}{h_{cl}} = const$ – относительная поперечная разнотощинность полос;

Момент инерции поперечного сечения бочек обоих валков определяется по формуле:

$$J_c = J_0 + J_p + a_0^2 \cdot F_0 + a_0^2 \cdot F_p, \tag{4}$$

Где $J_0 = \frac{\pi \cdot D^4}{64}$ –момент инерции сечения бочки опорного валка, см$^4$;

$J_p = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$ –момент инерции сечения бочки рабочего валка, см$^4$;

$F_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{64}$ –площадь поперченого сечения опорного валка, см$^2$;

$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{64}$ –площадь попреченого сечения рабочего валка, см$^2$;

$F_c = \frac{F_0 + F_p}{2}$ – средняя площадь поперечного сечения валков, см$^2$;

$a_0 = \frac{D + d}{2 \cdot (1 + m^2)} \cdot m$ – расстояние центров тяжести сечений

опорного валка;

$a_p = \frac{D + d}{2 \cdot (1 + m^2)}$ – расстояние центров тяжести сечений

рабочего валка;

Где D и d- диаметр бочки опорного и рабочего валков, см;

$m = \frac{D}{d}$ – отношение диаметров опорного и рабочего валков.

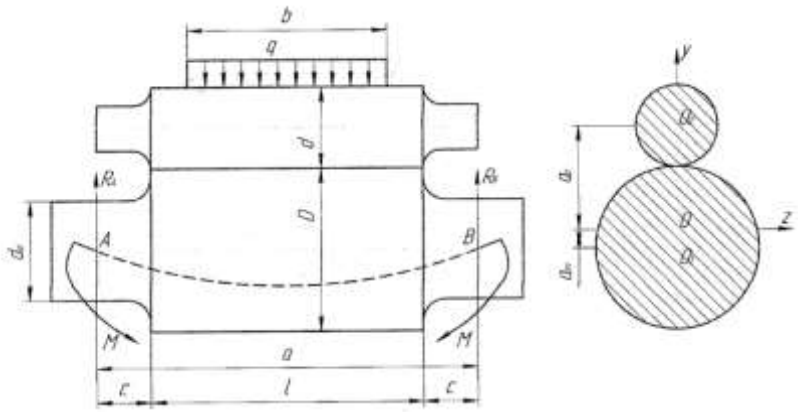


Рисунок 5- Схема валковой системы четырех валкового стана.

Схемы прокатки с назначением вида прокатки в каждом проходе

Воздействие на усилие прокатки- один из основных способов регулирования плоскостности полосы. От этого показателя зависит прогиб валка. Чем больше усилие прокатки, тем больше прогиб валка, а следовательно это влияет на геометрию полосы. Для компенсации этого явления используют валки в форме бочки.

Известно, что на энергосиловые параметры прокатки полосы оказывают влияние кинематические характеристики (скорость) процесса прокатки. На универсальном стане холодной прокатки предлагается учитывать не

только вытяжку или обжатие, но и в каждом проходе осуществить разные кинематические варианты процесса прокатки.

В частности симметричный (СП), когда валки вращаются в разные стороны и их скорости равны, либо процесс прокатки-волочения (ПВ), когда соотношение окружных скоростей валков равно вытяжке полосы.

Но в интервале между этими процессами лежит большое количество асимметричных процессов (АС), которыми можно варьировать, влияя на энергосиловые параметры, в частности на давление.

С целью обеспечения сохранения относительной разнотолщинности подката и готовой продукции, что позволит исключить дополнительное образование дефектов плоскостности, целесообразно осуществить прокатку полос при разных кинематических режимах.

Для оценки влияния кинематических режимов на силовые параметры прокатки и, как следствие, на плоскостность проката, исследуя схему прокатки с 2,5 мм на 0,5 мм, наиболее востребованную в номенклатуре производства .

Для обеспечения разных кинематических режимов прокатки (СП, АС, ПВ) на стане “Кварто 1700” необходимо применение натяжных станций перед и за клетью стана. Данные станции позволят обеспечить процесс прокатки с заданными скоростями концов полосы на стане “Кварто 1700”.

Для снижения изгиба и сплющивания валков необходимо обеспечить такую технологию прокатки, чтобы все усилия лежали на прямой, соответствующей оптимальному усилию изгиба (когда удельное давление по ширине полосы постоянно).

На сегодня известно два способа регулирования конечной толщины полосы при прокатке:

- Первый способ обусловлен тем, что регулированием зазора между валками задается обжатие полосы. При этом вытяжка полосы является

следствием этого процесса. Осуществляется в режиме поддержания заданного уровня натяжений полосы и присущ обычному способу прокатки.

- Второй способ заключается в том, что задается скорость полосы на границах очага деформации. Обжатие при этом является следствием. Такой способ присущ процессу прокатки- волочения.

При прокатке-волочении в ведущем валке имеется только зона отставания (критический угол $\gamma = 0$), а на ведомом только зона опережения (критический угол равен углу захвата $\gamma = a$). Силы контактного трения направлены в противоположные стороны, благодаря этому исключается подпирающее действие сил трения на деформируемый объем и значительно снижается давление металла на валки.

Благодаря наличию резерва сил трения на дугах охвата и отсутствию проскальзывания полосы относительно поверхности валков процесс приобретает свойства саморегулирования.

Опираясь на опыт теоретического и экспериментального исследования процесса прокатки- волочения, можно назвать следующие особенности процесса прокатки с заданными скоростями полосы на границах очага деформации:

1) Коэффициент вытяжки полосы определяется соотношением скоростей переднего и заднего концов полосы и в определенных пределах не зависит от других параметров процесса.
2) Процесс прокатки имеет область возможных натяжений и давлений.

При этом максимальному уровню давлений будет соответствовать минимальное натяжение и наоборот.

В указанной области коэффициент вытяжки полосы не будет зависеть от давления металла на валки. При изменении давления металла на валки, необходимо изменять и натяжение полосы для сохранения прежней вытяжки.

3) Процесс прокатки имеет область возможных скоростей и соотношений скоростей валков:

$$V_0 \le V_{в0} \le V_1, \quad (5)$$

$$V_0 \le V_{в1} \le V_1. \quad (6)$$

Где $V_{в1}$ – окружная скорость верхнего валка;

$V_{в0}$ – окружная скорость нижнего валка;

$V_0$ – скорость полосы на входе в очаг деформации;

$V_1$ – скорость полосы на выходе из очага деформации;

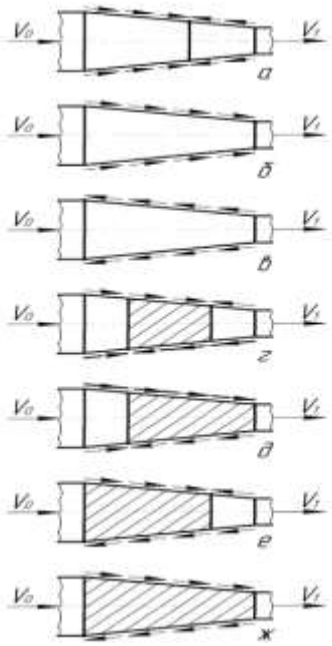


Рисунок 6 – Частные случаи процесса прокатки

а) Симметричный процесс

б) Симметричный процесс с одной зоной отставания

в) Симметричный процесс с одной зоной опережения

г) Асимметричный процесс

д) Частично- предельный случай нессиметричного процесса

е) Частично—предельный случай несимметричного процесса

ж) Прокатка- волочение

Преимущества асимметричного процесса прокатки с установленными натяжными станциями на стан:

1) Наличие области натяжений и давлений для одной и той же вытяжки упростит настройку стана.
2) Возможность получать одну и ту же вытяжку при разном давлении позволит в определенных пределах регулировать поперечный профиль полосы.
3) Наличие области возможных скоростей и рассогласований скоростей валков дает возможность получать одинаковую вытяжку при разной схеме сил трения в очаге деформации.

По сравнению с прокаткой- волочением:

1) К области давлений и натяжений, присущих ПВ, имеется область возможных скоростей и рассогласований скоростей валков при постоянной вытяжке, что делает процесс более универсальным, чем процесс ПВ;

Изменение скоростей и соотношений скоростей валков позволит при необходимости в некотором диапазоне варьировать энергосиловые параметры процессов (давление, натяжение, моменты) при сохранении постоянной вытяжки и более рационально использовать возможности оборудования.

2) При ПВ возможны вытяжки, за проход ограничены допустимой величиной натяжений. В данном процесс заданная вытяжка полосы может быть получена при различных значениях натяжений. Отсутствие “жесткой” связи между вытяжкой и натяжением является одним из основных преимуществ процесса ПВ;

3) Независимость вытяжки от рассогласования валков делает процесс более гибким, чем ПВ.

## 2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ НАГРУЗКИ НА ВАЛКОВЫЙ УЗЕЛ ПРИ РАЗНЫХ КИНЕМАТИЧКЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Для более наглядного представления влияния рассогласования скоростей на энергосиловые параметры, произведем расчеты усилий прокатки при разных кинематических режимах.

### *2.1.Расчет усилий прокатки*

Таблица 2 –Режимы обжатий при прокатке 2,5→0,5

| № прохода | Толщина полосы, мм | | Относительная деформация, % |
|---|---|---|---|
| | $h_0$ | $h_1$ | $\varepsilon_i$ |
| 1 | 2,5 | 1,85 | 26,0 |
| 2 | 1,85 | 1,55 | 16,2 |
| 3 | 1,55 | 1,3 | 16,1 |
| 4 | 1,3 | 1,13 | 13,0 |
| 5 | 1,13 | 0,98 | 11,5 |
| 6 | 0,98 | 0,86 | 12,2 |
| 7 | 0,86 | 0,75 | 12,8 |
| 8 | 0,75 | 0,66 | 12,0 |
| 9 | 0,66 | 0,59 | 10,6 |
| 10 | 0,59 | 0,53 | 10,2 |
| 11 | 0,53 | 0,5 | 9,4 |

Определим коэффициент вытяжки по формуле:

$$\lambda_i = \frac{h_{0i}}{h_{1i}}. \quad (7)$$

Для первого прохода коэффициент вытяжки равен:

$$\lambda_i = \frac{2,5}{1,85} = 1,35.$$

Определим суммарный коэффициент вытяжки по формуле:

$$\lambda_{0i} = \frac{h_0}{h_{1i}}. \quad (8)$$

Для первого прохода суммарный коэффициент вытяжки равен:

$$\lambda_{0i} = \frac{h_0}{h_{1i}} = \frac{2,5}{1,85} = 1,35.$$

Для остальных проходов расчет коэффициента вытяжки и суммарного коэффициента вытяжки аналогичен. Результаты расчета приведены в таблице 3.

Сопротивление металла может быть определено по формуле [10]:

$$\sigma_{sci} = \sigma_{0,2} + a \cdot \left( \frac{\lambda 0 - 1}{\lambda 0} \cdot 100 \right)^b. \quad (9)$$

Где для стали 12Х18Н10Т: $\sigma_{0,2} = 410$ МПа, a= 24, b= 0,91.

Для первого прохода:

$$\sigma_{sc1} = 410 + 24 \cdot \left( \frac{1,35 - 1}{1,35} \cdot 100 \right)^b = 875,4 \text{ МПа}.$$

Для остальных проходов расчет сопротивления металла пластической деформации аналогичен. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3- Коэффициент вытяжки полосы и сопротивление металла пластической деформации.

| № прохода | $\lambda_i$ | $\lambda_{0i}$ | $\sigma_{sc}$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 1,35 | 1,35 | 875,41 |
| 2 | 1,19 | 1,61 | 1 067,38 |
| 3 | 1,19 | 1,92 | 1 223,09 |
| 4 | 1,15 | 2,21 | 1 327,28 |
| 5 | 1,15 | 2,55 | 1 418,24 |
| 6 | 1,14 | 2,91 | 1 490,42 |
| 7 | 1,15 | 3,33 | 1 556,17 |

Продолжение таблицы 3

| № прохода | $\lambda_i$ | $\lambda_{0i}$ | $\sigma_{sc}$ |
|---|---|---|---|
| 8 | 1,14 | 3,79 | 1 609,69 |
| 9 | 1,12 | 4,24 | 1 651,16 |
| 10 | 1,11 | 4,72 | 1 686,59 |
| 11 | 1,06 | 5,00 | 1 704,26 |

Расчет усилия при симметричной прокатке ($K_v = 1$).

Среднее удельное давление рассчитывается по формуле:

$$p_c = \frac{\sigma_{sc} \cdot h_\gamma \cdot \ln\lambda - \sigma_0 \cdot (h_0 - h_\gamma) - \sigma_1 \cdot (h_\gamma - h_1)}{\Delta h - 2fR \cdot \left[a_0 - (\gamma_1 + \gamma_2)\right] + 2f \cdot h_\gamma \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left( \operatorname{arctg}\sqrt{\lambda - 1} - 2\operatorname{arctg}\gamma \sqrt{\frac{R}{h_1}} \right)}, \quad (10)$$

В качестве исходных данных принимаем:

R- радиус валка (R=250 мм);

f- коэффициент трения (f= 0,1);

b- ширина полосы (b= 1000 мм);

λ- коэффициент вытяжки полосы в рассматриваемом проходе;

$h_0$ – начальная высота полосы, мм;

$h_1$ – высота полосы после прохода, мм;

Угол захвата:

$$a_0 = \sqrt{\frac{h_0 - h_1}{R}}; \quad (11)$$

Для первого прохода:

$$a_0 = \sqrt{\frac{2,5 - 1,85}{250}} = 0,05 \text{ рад.}$$

Критический угол:

$$\gamma = \frac{a_0}{2}\left(1 - \frac{a_0}{2f}\right). \qquad (12)$$

Для первого прохода:

$$\gamma = \frac{0,05}{2}\left(1 - \frac{0,05}{2 \cdot 0,1}\right) = 0,019\,\text{рад}.$$

Высота полосы в критическом сечении:

$$h_\gamma = h_1. \qquad (13)$$

Для первого прохода:

$$h_\gamma = 1,85 + 250 \cdot 0,018^2 = 1,93\,\text{мм}.$$

Напряжение заднего и переднего натяжения для всех проходов рассчитаем для двух случаев, когда $\sigma_0 = \sigma_1 = 0,3 * \sigma_{sc}$ и при $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$.

Так при $\sigma_0 = \sigma_1 = 0,3 * 875,41 = 262,62$ МПа среднее нормальное контактное напряжение при симметричной прокатке будет равно:

$$P_c = \frac{875,41 \cdot 1,93 \cdot \ln 1,35 - 262,62 \cdot (2,5 - 1,93) - 262,62 \cdot (1,93 - 1,85)}{0,65 - 2 \cdot 0,1 \cdot 250 \cdot (0,018 - 2 \cdot 0,05) + 2 \cdot 0,1 \cdot 1,82\sqrt{\frac{250}{1,85}}\left(\text{arctg}\sqrt{1,35 - 1} - 2\text{arctg}0,018\sqrt{\frac{250}{1,85}}\right)} = 807,85\,\text{Мпа}$$

Усилия прокатки вычисляются по формуле [9]:

$$P = p_c \cdot b \cdot l. \qquad (14)$$

Длина очага деформации с учетом упругого сплющивания валков рассчитывается по формуле:

$$l = \sqrt{R \cdot \Delta h + (1,5m \cdot R \cdot p_c)^2} + 1,5m \cdot R \cdot p_c, \qquad (15)$$

Где m= $1,12*10^{-5}\ \frac{1}{\text{МПа}}$.

Для первого прохода:

$$l=\sqrt{(250\cdot 0,65+(1,5\cdot 1,12\cdot 10^{(-5)}\cdot 250\cdot 807,85)^2)}+1,5\cdot 1,12\cdot 10^{(-5)}\cdot 250\cdot 807,85=16,58 \text{ мм.}$$

Усилие прокатки будет равно:

$$P=807,85\cdot 1000\cdot 16,58=17,42\,\text{МН}.$$

Для остальных проходов расчеты представлены в таблице 4.

Таблица 4- Результаты расчетов давления при симметричной прокатке

| № прохода | $a_0$, рад | ɣ, рад | $h_ɣ$ | $\sigma_0=\sigma_1=0,3*\sigma_{sc}$ | | $\sigma_0=\sigma_1=0$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $P_c$, *МПа* | *P*, МН | $P_c$, *МПа* | *P, МН* |
| 1 | 0,051 | 0,0190 | 1,940 | 807,85 | 17,42 | 1212,60 | 22,82 |
| 2 | 0,035 | 0,0143 | 1,601 | 999,82 | 17,97 | 1465,29 | 24,58 |
| 3 | 0,032 | 0,0133 | 1,344 | 1200,86 | 22,51 | 1758,71 | 32,01 |
| 4 | 0,026 | 0,0113 | 1,162 | 1312,53 | 23,97 | 1910,90 | 35,09 |
| 5 | 0,024 | 0,0107 | 1,009 | 1466,08 | 28,29 | 2134,61 | 42,31 |
| 6 | 0,022 | 0,0098 | 0,884 | 1579,09 | 31,27 | 2294,68 | 47,55 |
| 7 | 0,021 | 0,0094 | 0,772 | 1748,00 | 37,18 | 2541,89 | 57,37 |
| 8 | 0,019 | 0,0086 | 0,678 | 1866,23 | 41,24 | 2709,89 | 64,25 |
| 9 | 0,017 | 0,0077 | 0,605 | 1928,19 | 43,15 | 2793,46 | 67,56 |
| 10 | 0,015 | 0,0071 | 0,543 | 2030,09 | 47,22 | 2938,87 | 74,29 |
| 11 | 0,011 | 0,0052 | 0,507 | 1776,64 | 35,59 | 2555,68 | 55,74 |

Расчет усилия при асимметричной прокатке ($1\leq K_v \leq K_{vkp}$)

$$P_c=\frac{\sigma_{sc}\cdot h_\gamma\cdot \ln\lambda-\sigma_0\cdot\left(h_0-h_{\gamma 1}\right)-\sigma_1\cdot\left(h_{\gamma 1}-h_1\right)}{\Delta h-2fR\cdot\left[a_0-\left(\gamma_1+\gamma_2\right)\right]+2\cdot f\cdot h_{\gamma 1}\sqrt{\frac{R}{h_1}}\left(\operatorname{arctg}\sqrt{\lambda-1}-2\operatorname{arctg}\gamma_1\sqrt{\frac{R}{h_1}}-\operatorname{arctg}\gamma_2\sqrt{\frac{R}{h_1}}\right)}. \qquad (16)$$

Критическое соотношение окружных скоростей валков равно:

$$K_{vkp}=1+\frac{4\cdot\gamma^2\cdot R}{h_1}. \qquad (17)$$

Для первого прохода:

$$K_{vkp} = 1 + \frac{4 \cdot 0,019^2 \cdot 250}{1,85} = 1,19.$$

Критический угол на контакте с ведущим валком:

$$\gamma_1 = \gamma - \frac{K_v - 1}{4 \cdot \gamma} \cdot \frac{h_1}{R}. \qquad (18)$$

Для первого прохода:

$$\gamma_1 = 0,019 - \frac{1,19 - 1}{4 \cdot 0,017} \cdot \frac{1,85}{250} = 0\,\text{рад}.$$

Высота полосы в критическом сечении:

$$h_{\gamma 1} = h_1 + R_{\gamma 1}{}^2.$$

Для первого прохода:

$$h_{\gamma 1} = 1,85 + 250 \cdot 0 = 1,85\,\text{мм}.$$

Критический угол на контакте с ведомым валком:

$$\gamma_2 = \frac{1}{2 \cdot K_v} \cdot \left( 2\gamma - \frac{K_v - 1}{2_\gamma} \cdot \frac{h_1}{R} \right). \qquad (19)$$

Для первого прохода:

$$\gamma_2 = \frac{1}{2 \cdot 1,19} \cdot \left( 2 \cdot 0,019 - \frac{1,19 - 1}{2 \cdot 0,019} \cdot \frac{1,85}{250} \right) = 0,016\,\text{рад}.$$

Высота полосы в критическом сечении:

$$h_{\gamma 2} = h_1 + R\gamma_2{}^2. \qquad (20)$$

Для первого прохода:

$$h_{\gamma 2} = 1,85 + 250 \cdot 0,015^2 = 1,9\,\text{рад}.$$

Напряжение заднего и переднего натяжения принимаем

$$\sigma_0 = \sigma_1 = 0,3 \cdot \sigma_{sc}.$$

Среднее нормальное контактное напряжение при асимметричной прокатке будет равно:

$$P_c = \frac{875,41 \cdot 1,85 \cdot \ln 1,35 - 262,62 \cdot (2,5 - 1,85) - 262,62 \cdot (1,85 - 1,85)}{0,65 - 2 \cdot 0,1 \cdot 250 \cdot (0,051 - (0 + 0,015)) + 2 \cdot 0,1 \cdot 1,82 \sqrt{\frac{250}{1,85}} \left( \operatorname{arctg} \sqrt{1,35 - 1} - \operatorname{arctg} 0 \cdot \sqrt{\frac{250}{1,85}} - \operatorname{arctg} 0,015 \sqrt{\frac{250}{1,85}} \right)} = 787,51 \text{МПа}$$

Длина очага деформации с учетом упругого сплющивания валков рассчитывается по формуле (15):

Для первого прохода:

$$l = \sqrt{250 \cdot 0,65 + (1,5 \cdot 1,12 \cdot 10^{(-5)} \cdot 250 \cdot 444,49)^2} + 1,5 \cdot 1,12 \cdot 10^{(-5)} 250 \cdot 444,49 = 14,75 \text{ мм.}$$

Усилие прокатки вычисляется по формуле (14):

$$P = 787,5 \cdot 1000 \cdot 16,58 = 12,97 \text{ МН.}$$

Для остальных проходов рассчитывается аналогично.

Таблица 5-Результаты расчетов усилия прокатки при асимметричном процессе

| № прохода | $K_{vkp}$ | $\gamma_1$, рад | $h_{\gamma 1}$, мм | $\gamma_2$, рад | $h_{\gamma 2}$, мм |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,195 | 0 | 1,85 | 0,032 | 2,102 |
| 2 | 1,132 | 0 | 1,55 | 0,025 | 1,710 |
| 3 | 1,136 | 0 | 1,3 | 0,023 | 1,437 |
| 4 | 1,114 | 0 | 1,13 | 0,020 | 1,234 |
| 5 | 1,118 | 0 | 0,98 | 0,019 | 1,072 |
| 6 | 1,111 | 0 | 0,86 | 0,018 | 0,937 |
| 7 | 1,118 | 0 | 0,75 | 0,017 | 0,821 |

Продолжение таблицы 5

| № прохода | $K_{vkp}$ | $\gamma_1$, рад | $h_{\gamma 1}$, мм | $\gamma_2$, рад | $h_{\gamma 2}$, мм |
|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 1,112 | 0 | 0,66 | 0,015 | 0,720 |
| 9 | 1,100 | 0 | 0,59 | 0,014 | 0,639 |
| 10 | 1,096 | 0 | 0,53 | 0,013 | 0,572 |
| 11 | 1,054 | 0 | 0,5 | 0,010 | 0,524 |

Таблица 6- Результаты расчетов среднего удельного давления и усилия прокатки асимметричного процесса:

| № прохода | $\sigma_0 = \sigma_1 = 0{,}3 * \sigma_{sc}$ | | $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$ | |
|---|---|---|---|---|
| | $P_c$, *МПа* | *P*, МН | $P_c$, *МПа* | *P, МН* |
| 1 | 787,5 | 12,97 | 1211,6 | 19,96 |
| 2 | 983,5 | 13,50 | 1464,0 | 20,09 |
| 3 | 1180,8 | 16,87 | 1757,2 | 25,11 |
| 4 | 1294,4 | 18,02 | 1909,3 | 26,58 |
| 5 | 1445,1 | 21,23 | 2132,8 | 31,33 |
| 6 | 1558,0 | 23,49 | 2292,8 | 34,56 |
| 7 | 1723,2 | 27,87 | 2539,8 | 41,08 |
| 8 | 1841,1 | 30,94 | 2707,7 | 45,50 |
| 9 | 1905,1 | 32,44 | 2791,3 | 47,53 |
| 10 | 2006,6 | 35,52 | 2936,6 | 51,98 |
| 11 | 1765,1 | 27,03 | 2554,2 | 39,12 |

Расчет усилия при прокатке- волочении ($K_{vkp} = \lambda$)

Процесс ПВ может быть реализован при изменении натяжений в границах:

- первый предельный случай (ПВ1) при $\sigma_{1min} = \sigma_{sc} * ln\lambda, \sigma_0 = 0$;

- второй предельный случай (ПВ2) при $\sigma_{1max} = \sigma_s, \sigma_{0max} = \sigma_{sc}(1 - ln\lambda)$.

Первый предельный случай (ПВ1) рассчитаем по формуле:

$$P_{пв1} = \sigma_{sc} \cdot \left(1 - \frac{\ln\lambda}{2}\right). \quad (21)$$

Второй предельный случай (ПВ2) при $\sigma_1 = \sigma_{sc}$ рассчитывается по формуле:

$$P_{пв2} = \sigma_{sc} \cdot \left(\frac{\ln\lambda}{2}\right). \quad (22)$$

Произведем расчет процесса ПВ при $\sigma_{1max} = 0{,}3 * \sigma_{sc}$,

$\sigma_0 = \sigma_{1max} - \sigma_{sc} * ln\lambda.$

$$P_{пв_i} = \sigma_{sc} \cdot \left(0{,}7 - \frac{\ln\lambda}{2}\right). \quad (23)$$

Для первого прохода:

$$P_{пв1} = 875{,}4 \cdot \left(1 - \frac{\ln 1{,}35}{2}\right) = 743{,}6.$$

Длина очага деформации с учетом упругого сплющивания валков:

$$l = \sqrt{250 \cdot 0{,}65 + \left(1{,}5 \cdot 1{,}12 \cdot 10^{-5} \cdot 250 \cdot 444{,}49\right)^2} + 1{,}5 \cdot 1{,}12 * 10^{-5} \cdot 250 \cdot 444{,}49 = 16{,}47 \text{ мм.}$$

Усилие прокатки:

$$P = 743{,}6 \cdot 1000 \cdot 16{,}47 = 12{,}97 \text{ МН.}$$

Таблица 7- Результаты расчетов усилия прокатки при прокатке- волочении

| № прохода | $\sigma_0 = \sigma_1 = 0{,}3 \cdot \sigma_{sc}$ | | $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$ | |
|---|---|---|---|---|
| | *$P_c$, МПа* | *P*, МН | *$P_c$, МПа* | *P*, МН |
| 1 | 743,61 | 12,08 | 223,08 | 3,62 |
| 2 | 972,95 | 13,29 | 291,88 | 3,98 |
| 3 | 1115,52 | 15,47 | 334,65 | 4,64 |
| 4 | 1234,27 | 16,67 | 370,27 | 5,00 |
| 5 | 1317,24 | 18,15 | 395,17 | 5,44 |
| 6 | 1393,08 | 19,31 | 417,92 | 5,79 |
| 7 | 1449,68 | 20,47 | 434,90 | 6,14 |
| 8 | 1506,80 | 21,45 | 452,04 | 6,43 |
| 9 | 1558,59 | 22,31 | 467,57 | 6,69 |

Продолжение таблицы 7

| № прохода | $\sigma_0 = \sigma_1 = 0{,}3 \cdot \sigma_{sc}$ | | $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$ | |
|---|---|---|---|---|
| | $P_c$, *МПа* | $P$, МН | $P_c$, *МПа* | $P$, МН |
| 10 | 1596,14 | 23,05 | 478,84 | 6,91 |
| 11 | 1654,61 | 23,85 | 496,38 | 7,15 |

По рассчитанным данным построим графики зависимостей усилий прокатки от толщины полосы при прокатке полос 2,5 мм→0,5 мм.

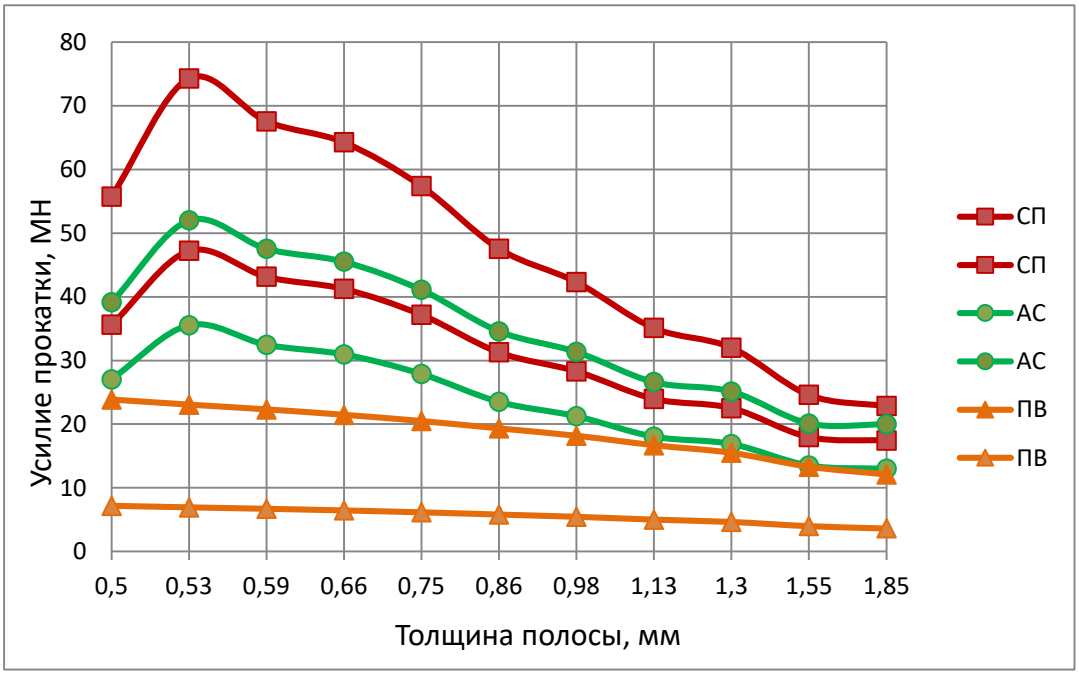


Рисунок 7- График зависимости усилий прокатки от толщины полосы

1) СП при $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$; 2) СП при $\sigma_0 = \sigma_1 = 0{,}3 * \sigma_{sc}$;

3) АС при $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$; 4) АС при $\sigma_0 = \sigma_1 = 0{,}3 * \sigma_{sc}$;

5) ПВ при $\sigma_{1max} = 0{,}3 * \sigma_{sc}$; 6)ПВ при $\sigma_0 = \sigma_{1max} - \sigma_{sc} * ln\lambda$.

Как следует из графиков, уровень давления и область изменения давления при СП, АС и ПВ процессах существенно разнятся.

Минимальный уровень давления при прокатке на конечную толщину полосы достигается при ПВ с натяжениями на концах полосы.

Наибольший уровень давления требуется обеспечить при прочих равных условиях при СП процессе.

Таким образом показано, что применяя разные кинематические режимы прокатки в том числе по проходам, можно существенно влиять на давление прокатки, которое является определяющим при сплющивании валков и прогибе валков при прокатке, и, как следствие, сказывается на плоскостности прокатываемых полос.

*2.2. Анализ поведения валкого узла*

Согласно формуле (3), в зависимости от разных факторов мы можем построить несколько графиков зависимости усилия изгиба валковой системы от толщины полосы [10].

Прямая изменения усилия изгиба валковой системы может иметь несколько значений, например в зависимости от выбранной $k$ относительной поперечной разнотолщинности подката. Если взять несколько значений $k_1$ =0,05; $k_2$= 0,03; $k_3$= 0,01; при постоянной ширине полосы $b$ и совместить их относительно толщины полосы $h_{li}$.

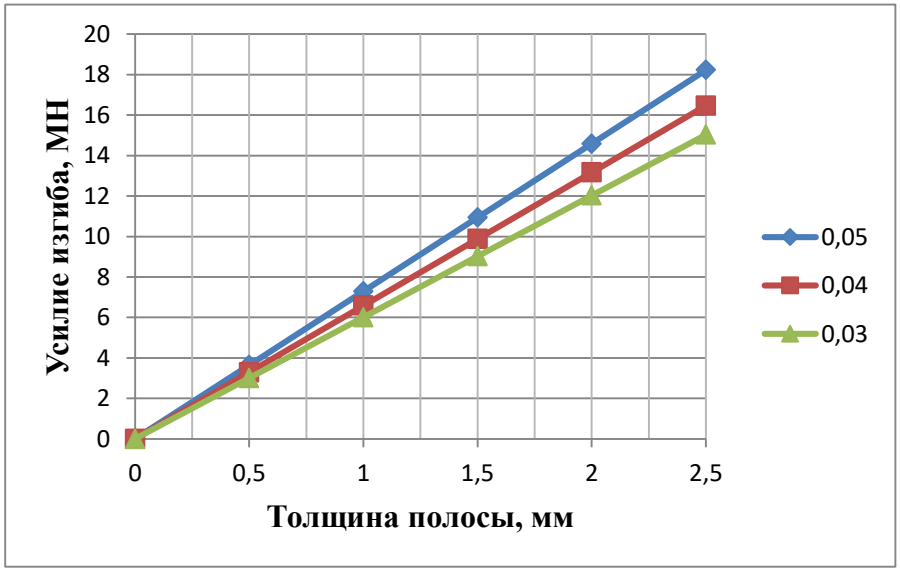


Рисунок 8- График зависимости усилия изгиба валковой системы от толщины полосы при постоянной ширине.

Эти же графики мы можем построить при постоянной k варьируя шириной полосы (рисунок 8). Видно, что прямая изменения усилия изгиба валковой системы не одна постоянная, а зависит от множества параметров.

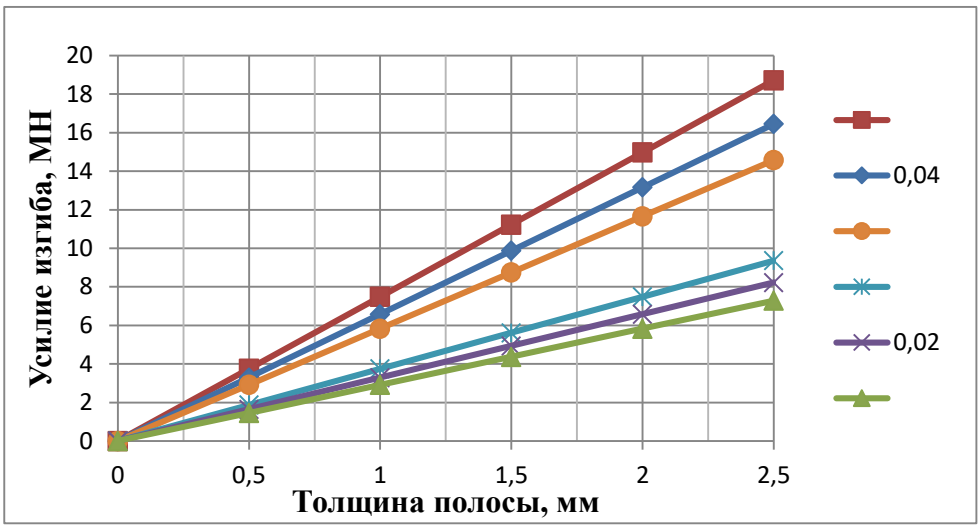


Рисунок 9- График зависимости усилия изгиба валковой системы от толщины полосы

Построим прямую при k=0,04 и воспользуемся противоизгибом рабочих валков. В зависимости от направления противоизгиба рабочих валков мы можем эту линию смещать в разных направлениях.

На рисунке 9 показано смещение базовой линии в положительном и отрицательном направлениях на 10% и 20% при действии противоизгиба.

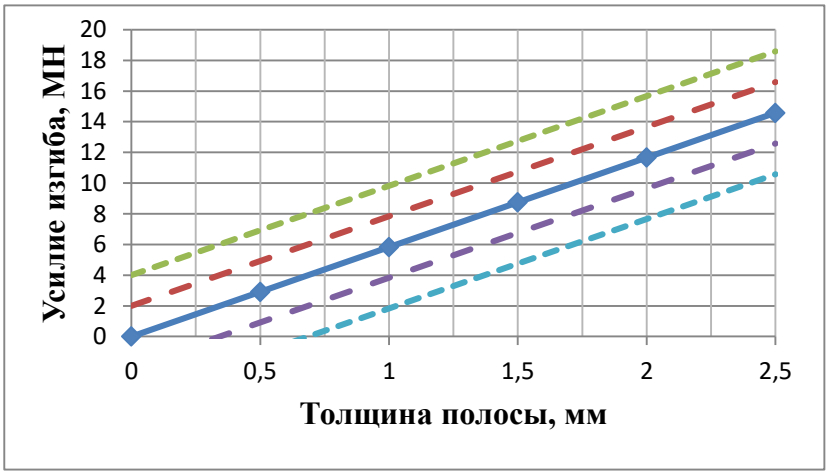


Рисунок 10- График зависимости усилия изгиба валковой системы при k=0,04 от толщины полосы при воздействии противоизгиба.

1- Воздействие противоизгиба 0%; 2,4- воздействие противоизгиба 10%; 3,5- воздействие противоизгиба 20%.

Из рассмотренных вариантов работы валкового узла следует, что его работа зависит от исходной поперечной разнотолщинности, ширины полосы и от воздействия давления на полосу.

Для расчета оптимального усилия воспользуемся формулами (3) и (4). Значение относительной разнотолщинности подката выбираем из таблицы 2.

Расчеты при прокатке полос 2,5 мм→0,5 мм.

Таблица 8- Результаты расчетов оптимального усилия

| № прохода | $k$ | $P_{опт}$, МН |
|---|---|---|
| 1 | 0,015 | 24,93 |
| 2 | | 18,45 |
| 3 | | 15,46 |
| 4 | | 12,97 |
| 5 | | 9,77 |
| 6 | | 8,58 |
| 7 | | 7,48 |
| 8 | | 6,58 |
| 9 | | 5,89 |
| 10 | | 5,29 |
| 11 | | 4,99 |

По полученным данным совместим графики зависимостей оптимального усилия от толщины полосы (Рисунок 11).

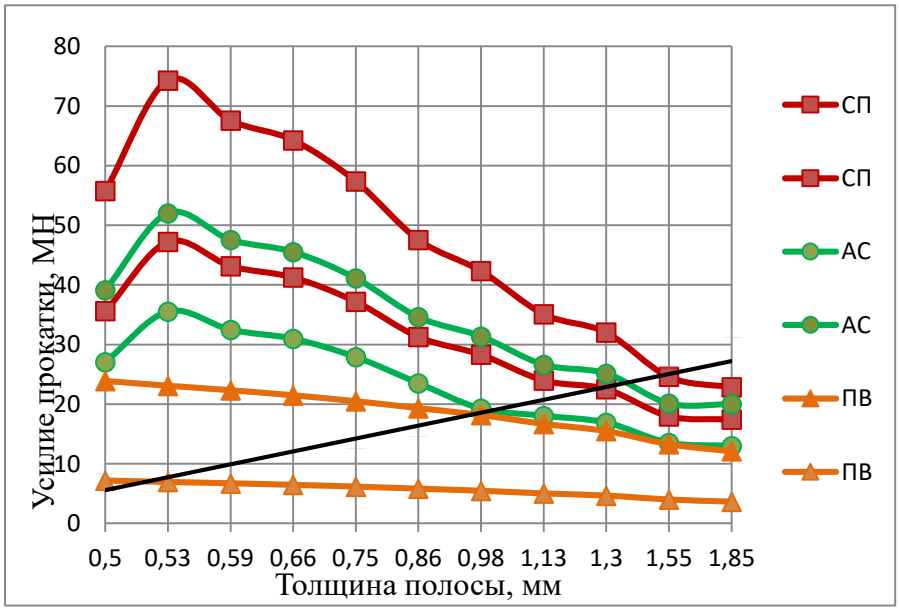


Рисунок 11- График зависимостей усилий прокатки и оптимального усилия от толщины полосы

Результаты расчетов при прокатке полос 2,5→0,5 мм, с применением разных процессов прокатки приведены в таблице 9. Для расчетов использовались формулы (1-4) и (7-23).

Таблица 9 - Результаты расчетов усилия прокатки и оптимального усилия изгиба.

| № прохода | Толщина полосы, мм | | Варианты процесса прокатки | $K_v$ | $\sigma_{sc}$, МПа | $\sigma_0$, МПа | $\sigma_1$, МПа | $P$, МН | $P_{опт}$, МН |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | h0 | h1 | | | | | | | |
| 1 | 2,5 | 1,72 | СП | 1,00 | 959,40 | 287,82 | 287,82 | 29,03 | 28,99 |
| 2 | 1,72 | 1,48 | СП | 1,00 | 1 111,31 | 333,39 | 333,39 | 24,71 | 24,94 |
| 3 | 1,48 | 1,3 | АП | 1,10 | 1 223,09 | 366,93 | 366,93 | 21,86 | 21,91 |
| 4 | 1,3 | 1,19 | АП | 1,07 | 1 290,65 | 387,19 | 387,19 | 20,72 | 20,06 |
| 5 | 1,2 | 1,13 | АП | 1,05 | 1 327,28 | 398,18 | 398,18 | 19,15 | 19,05 |
| 6 | 1,13 | 1,03 | ПВ | 1,10 | 1 388,01 | 287,79 | 416,40 | 17,26 | 17,36 |
| 7 | 1,03 | 1 | ПВ | 1,12 | 1 406,16 | 380,28 | 421,85 | 16,97 | 16,85 |
| 8 | 1 | 0,75 | ПВ | 1,33 | 1 556,17 | 237,17 | 466,85 | 12,00 | 12,64 |
| 9 | 0,75 | 0,5 | ПВ | 1,50 | 1 704,26 | 179,74 | 511,28 | 6,30 | 8,43 |

По рассчитанным данным построим график зависимости оптимального усилия от толщины полосы.

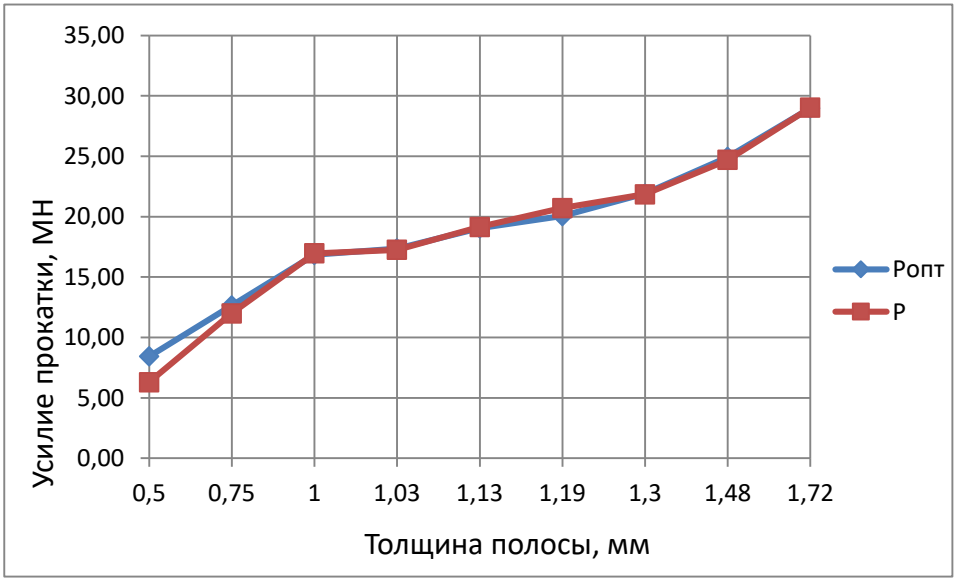


Рисунок 12- График зависимости оптимального усилия от толщины полосы (модуль изгиба валковой системы)

Для определения соответствия усилий давления и натяжений возможностям стана, проведем расчеты энергосиловых параметров [11].

*2.4. Расчет моментов и мощности*

Момент на валке при симметричном процессе прокатки равен:

$$M_в = P_{сп} \cdot f \cdot R \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\gamma}{a_0}\right). \quad (24)$$

Для первого прохода:

$$M_в = 2,282 \cdot 10^7 \cdot 0,1 \cdot 0,250 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0,019}{0,05}\right) = 136,9\,кН \cdot м.$$

Мощность прокатки при симметричном процессе прокатки равна:

$$N_в = M_в \cdot \frac{V_{пр}}{R}. \quad (25)$$

Для первого прохода:

$$N_в = 202,7 \cdot \frac{1,5}{250} = 810,7\,кВт.$$

Суммарная мощность в очаге деформации:

$$N_\Sigma = 2 \cdot N_в. \quad (26)$$

Для первого прохода:

$$N_\Sigma = 2 \cdot 810,7 = 1621,4\,кВт.$$

Второй проход рассчитываем аналогично.

Асимметричный процесс прокатки рассчитываем при $K_v = K_{vkp}$.

Момент на ведущем валке при асимметричном процессе равен:

$$M_{B1} = P_{ап} \cdot f \cdot R \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\gamma_1}{a_0}\right). \quad (27)$$

Критический угол на ведущем валке равен $\gamma_1 = 0$.

Для третьего прохода:

$$M_{B1} = 2,511 \cdot 10^7 \cdot 0,1 \cdot 0,250 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0}{0,05}\right) = 546,5\,кН \cdot м.$$

Мощность на ведущем валке равна:

$$N_{в1} = M_{в1} \cdot \frac{V_{пр}}{R}. \qquad (28)$$

Для третьего прохода:

$$N_{в1} = 627,7 \cdot \frac{5,0}{0,25} = 10929,1\,кВт.$$

Момент на ведомом валке при асимметричном процессе равен:

$$M_{в0} = P_{an} \cdot f \cdot R \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\gamma_0}{a_0}\right). \qquad (29)$$

Критический угол на ведомом валке равен:

$$\gamma_0 = 2\gamma.$$

Для третьего прохода момент на ведомом валке:

$$M_{в0} = 2,511 \cdot 10^7 \cdot 0,1 \cdot 0,25 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0,026}{0,032}\right) = -399,8\,кН \cdot м.$$

Мощность на ведомом валке равна:

$$N_{в0} = M_{в0} \cdot \frac{V_{пр}}{\lambda * R}. \qquad (30)$$

Для третьего прохода:

$$N_{в0} = -399,8 \cdot \frac{5,0}{1,19 \cdot 0,25} = -7024\,кВт.$$

Суммарная мощность в очаге деформации:

$$N_{\Sigma} = N_{в1} + N_{в2}. \qquad (31)$$

Для третьего прохода:

$$N_{\Sigma} = 10929{,}1 - 7024 = 3905{,}2\,\text{кВт}.$$

Четвертый и пятый проходы рассчитываем аналогично.

Момент на ведущем валке при прокатке- волочении равен:

$$M_{в1} = P_{пв} \cdot f \cdot R \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\gamma_1}{a_0}\right). \qquad (32)$$

Критический угол на ведущем валке равен $\gamma_1 = 0$.

Для шестого прохода:

$$M_{в1} = 13{,}86 \cdot 10^6 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}25 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0}{0{,}051}\right) = 217\,\text{кН} \cdot \text{м}.$$

Мощность на ведущем валке для шестого прохода рассчитывается по формуле:

$$N_{в1} = 217 \cdot \frac{5{,}0}{0{,}25} = 4340\,\text{кВт}.$$

Момент на ведомом валке при прокатке- волочением:

$$M_{в1} = 13{,}86 \cdot 10^6 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}25 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0{,}022}{0{,}022}\right) = -217\,\text{кН} \cdot \text{м}\ .$$

Мощность на ведомом валке:

$$N_{в0} = -217 \cdot \frac{5{,}0}{1{,}14 \cdot 0{,}25} = -3955{,}9\,\text{кВт}.$$

Суммарная мощность в очаге формации для шестого прохода рассчитывается по формуле (31):

$$N_{\Sigma} = N_{в1} + N_{в0}.$$

Для шестого прохода:

$$N_{\Sigma} = 4340 - 3955{,}9 = 384{,}1.$$

Четвертый и пятый проход рассчитываются аналогично.

Для остальных проходов расчет энергосиловых параметров аналогичен.

Результаты расчета приведены в таблице 10:

Таблица 10- Результаты расчетов энергосиловых параметров при прокатке полос

| № прохода | Вариант процесса прокатки | $M_{в1}$, кН*м | $M_{в0}$, кН*м | $N_{в1}$, кВт | $N_{в0}$, кВт | $N_{\Sigma}$, кВт |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | СП | 202,7 | 202,7 | 810,7 | 810,7 | 1621,4 |
| 2 | СП | 95,7 | 95,7 | 574,1 | 574,1 | 1148,2 |
| 3 | АП | 546,5 | -399,8 | 10929,1 | -7024,0 | 3905,2 |
| 4 | АП | 517,9 | -409,3 | 10357,8 | -7492,5 | 2865,3 |
| 5 | АП | 478,7 | -398,6 | 9573,8 | -7506,8 | 2067,0 |
| 6 | ПВ | 217,0 | -217,0 | 4340,0 | -3955,9 | 384,1 |
| 7 | ПВ | 127,3 | -127,3 | 3563,7 | -3459,9 | 103,8 |
| 8 | ПВ | 152,7 | -152,7 | 3054,0 | -2290,5 | 763,5 |
| 9 | ПВ | 157,5 | -157,5 | 1890,2 | -1260,1 | 630,1 |

По полученным данным построим графики зависимостей моментов прокатки от номера прохода.

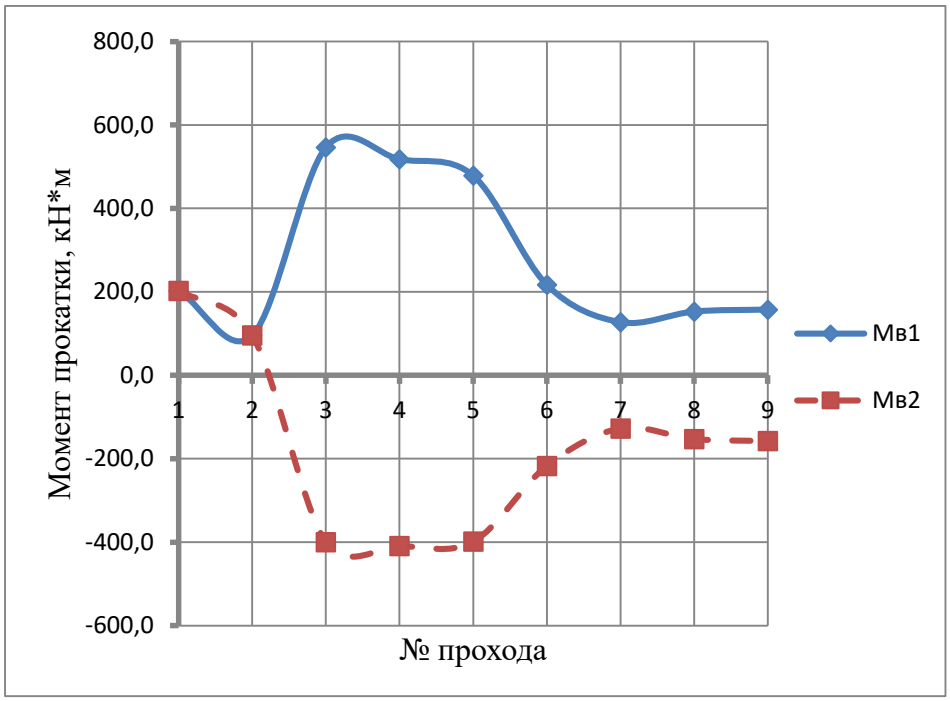


Рисунок 13- График зависимости моментов прокатки от номера прохода.

Так же по полученным данным из таблицы 10 построим график зависимости мощности от номера прохода.

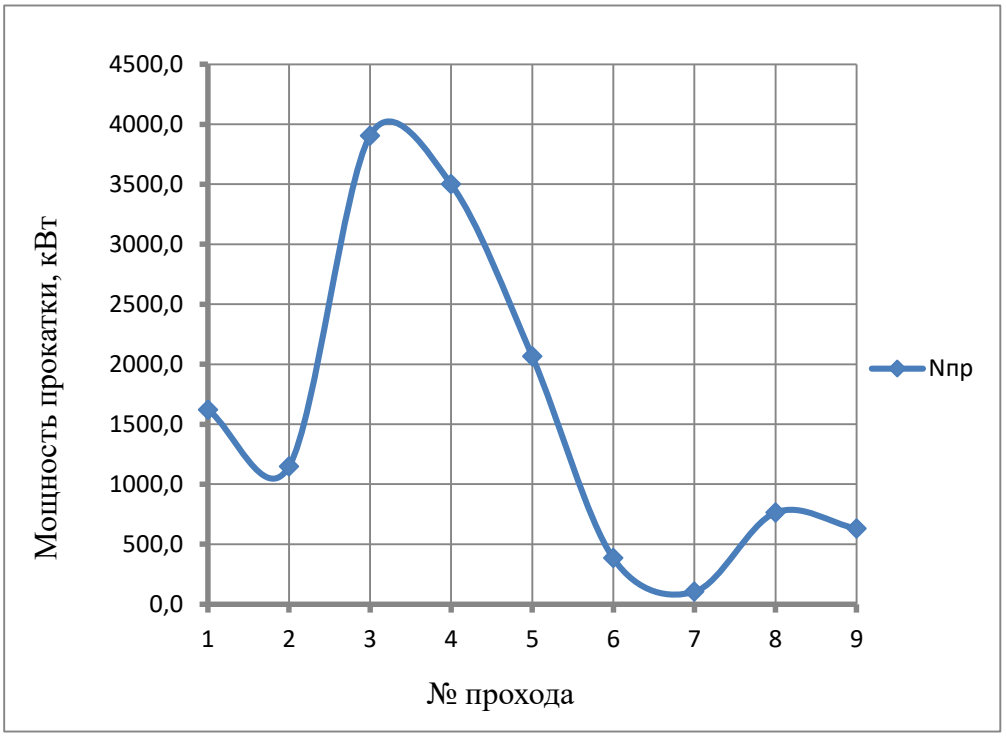


Рисунок 14- График зависимости мощности прокатки от номера прохода.

Таким образом при прокатке 3 и 4 проходы являются самыми нагруженными, однако суммарная мощность не превышает допустимых значений прокатного стана.

# 3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ГЛАВНОЙ ЛИНИИ СТАНА

## *3.1. Обоснование реконструкции главной линии стана*

На существующем стане есть возможность создать натяжение полосы при помощи моталок, но при использовании моталок сложно поддерживать необходимое натяжение полосы из- за постоянно меняющейся скорости движения полосы, связанной с постоянным изменением диаметра рулона. Применяемые натяжные устройства жестко закреплены к раме и для заправки полосы в такие устройства применяются проводки, что усложняет конструкцию и время заправки полосы.

С целью повышения точности холоднокатаных полос, необходимо разработать иную конструкцию натяжных устройств, обеспечивающую более высокую точность регулирвоания по сравнению с ранее использующимися.

Для сокращения времени заправки полосы, следует разработать натяжную станцию без направляющих устройств, что существенно упростит конструкцию и повысит технологичность главной линии стана [12].

# 4. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЛОСКОСТНОСТИ ПОЛОСЫ

Так как предложенная схема прокатки отличается от существующей и по проходам используются разные процессы, для этого необходимо адаптировать систему автоматического регулирования толщины полосы [12].

Регулирование плоскостности опирается на три основных составляющих: во-первых, средства и способы контроля неплоскостности, во-вторых, средства и способы воздействия на неплоскостность, и, в-третьих, способы определения управляющих воздействий по измеренным или прогнозируемым значениям неплоскостностности полосы, а так же средства реализации вычисления значений этих воздействий.

Основным способом определения плоскостности полосы на станах холодной прокатки является косвенное определение плоскостности по распределению натяжения по ширине полосы.

В данной четырехвалковой клети достижение плоскостности полосы осуществляется за счет обеспечения оптимального усилия прокатки по проходам и компенсации неточности установки давления путем дополнительного противоизгиба рабочего валка.

Актуальная блок-схема системы автоматического регулирования плоскостности полосы представлена на рисунке 15.

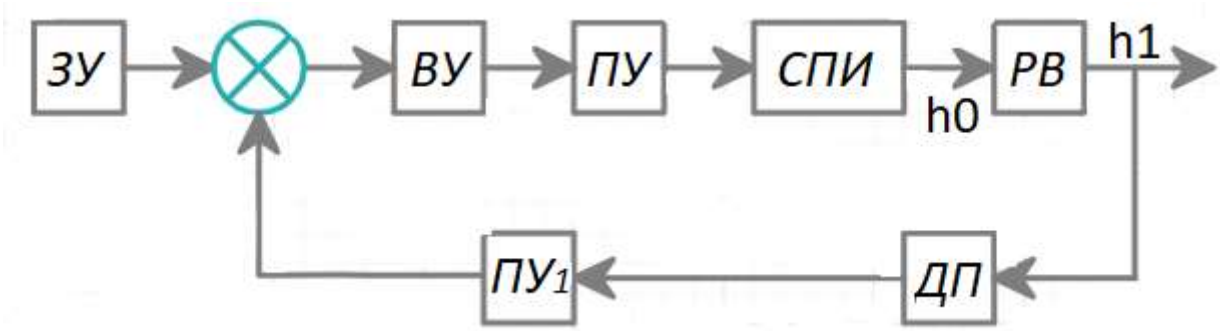


Рисунок 15- Блок-схема системы автоматического регулирования плоскостности полосы:

ЗУ- задающее устройство;

ВУ- вычислительное устройство;

ПУ, ПУ1- преобразовательное устройство;

СПИ- система противоизгиба полосы;

РВ- рабочие валки;

ДП- Датчик плоскостности полосы.

(Система автоматического регулирования плоскостности работает следующим образом: после начала прокатки плоскостность измеряется датчиком плоскостности (ДП), сигнал которого передается через преобразовательное устройство (ПУ) на сравнительный блок, где значение действительной плоскостности полосы сравнивается с требуемым значением.

Результат сравнения подается на вычислительное устройство (ВУ), где с учетом характеристик полосы выполняет расчет величины подстройки и подает сигнал через преобразовательное устройство (ПУ) на систему противоизгиба полосы (СПИ) и тем самым регулируется плоскостность полосы на выходе из клети.)

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) После анализа существующих способов и устройств для управления плоскостностью полос, а также разных кинематических процессов при холодной прокатке предложена гибкая технология для реверсивного четырехвалкового стана, позволяющая обеспечить плоскостность готовой полосы.

2) Используя различные варианты процессов, рассчитаны оптимальные давления прокатки, при которых сохраняется относительная разнотолщинность подката, соответствующая ГОСТ или ТУ, и таким образом обеспечивается сохранение плоскостности полосы.

3) Рассмотрено устройство автоматического регулирования плоскостности полосы на универсальном стане холодной прокатки “Кварто 1700”, позволяющее получить планшетную полосу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Профессионалы модернизации/ SMS group журнал группы компаний // sms group, издание от 03.2016 стр 16-21с.

2.Целиков Ф.И., Теория продольной прокатки / Ф.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. –М.: Металлургия, 1980. 320с

3. Условия (критерии) плоскостности при прокатке полос и листов / Я.Д. Васильев, А.Д. Дементиенко. // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 2003.- №9.- с. 30-33.

4.Пименов, А.С. Высокоточная прокатка тонких листов / А.С. Пименов, В.П. Полухин, Ю.В. Ливухин и др.- М.: Металлургия, 1988.- 177 с.

5. Гарбер, Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология) / Э.А. Гарбер.- М.: ОАО “Черметинформация”; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004. -416 с.

6. Литовченко Н.В. Станы и технология прокатки листовой стали: учебное пособие / Н.В. Литовченко. – М.: Металлургия, 1979.- 271с.

7.Антонов В.И. Холодная прокатка полос на реверсивных станах кварто 1700 в ЛПЦ-2Ж: технологическая интсрукциях / В.И. Антонов и др. – Челябинск: ОАО “Мечел”, 1998.- 67с.

8. Целиков А.И. Теория прокатки Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982- 335 с.

9. Коновалов Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки: Справочник / Ю.В. Коновалов и др. – М.: Металлургия, 1986.

10. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки / Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., В.А. Черный и др.– М.: Металлургия 1975. -290 с.

11. Дубинский Ф.С. Расчет энергосиловых параметров процесса прокатки с применением ЭВМ: Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию / Ф.С. Дубинский, В.И. Крайнов. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1994- 56с.

12. Выдрин В.Н. Автоматизация прокатного производства: учебное пособие / В.Н. Выдрин, А.С. Федосиенко. – М.: Металлургия, 1984.- 470с.