

Министерство образования и науки 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

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН
Рецензент

П.С. Катков

“ _____ ” _____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой

_____ В.Г. Шеркунов

“ _____ ” _____ 2017 г.

Тема работы: «Разработка конструкции опытной установки непрерывной
разливки полос из цинковых сплавов»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-15..04.02-2017-00.00.00 ПЗ**

Руководитель работы:
А.П. Пелленен _____ / /

Автор работы
А.С. Суржинский _____
/

студент группы П-245

АННОТАЦИЯ

А.С. Суржинский Разработка конструкции опытной установки непрерывной разливки полос из цинковых сплавов: Выпускная квалификационная работа. – Челябинск: ЮУрГУ, МиМТ, П-245, 2017. – 55 с., 16 ил., 4 табл., библиогр. список – 22 наим.

В выпускной квалификационной работе была исследована технология получения полос непрерывной разливкой, проведены следующие анализы: этапы развития непрерывной разливки полос, состояние технологии и технико-экономическая эффективность непрерывной разливки полос, современный уровень научных исследований по непрерывной разливки тонких полос, конструкции валков – кристаллизаторов и целесообразность использования непрерывной разливки полос в условиях ООО НПО «РосАнтиков». Выбраны параметры опытной установки, произведен расчет энергосиловых параметров непрерывной разливки цинковых полос. Представлены основные конструкторские решения по разработке рабочей клетки для непрерывной разливки полос и описана технология непрерывной разливки полос на опытной установке. Выполнен расчет на прочность основных узлов установок. Также разработана линия непрерывной разливки полос. Выполнены сборочные и рабочие чертежи в системе автоматизированного проектирования Компас-3D v16.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОС НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКОЙ.....	7
1.1 Этапы развития непрерывной разливки полос.....	7
1.2 Состояние технологии и технико – экономическая эффективность непрерывной разливки полос.....	12
1.3 Современный уровень научных исследований по непрерывной разливке тонких полос.....	18
1.4 Конструкции валков – кристаллизаторов.....	21
1.5 Целесообразность использования непрерывной разливки полос в условиях ООО НПО «РосАнтикор».....	23
2 ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ ПОЛОС.....	25
3 РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ ЦИНКОВЫХ ПОЛОС.....	27
4 ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ ПОЛОС.....	35
5 ТЕХНОЛОГИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ ПОЛОС НА ОПЫТНОЙ УСТАНОВКЕ.....	39
6 РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ УСТАНОВКИ.....	42
6.1 Расчет нажимного устройства.....	42
6.1.1 Нажимной винт.....	42
6.1.2 Нажимная гайка.....	45
6.2 Расчет элементов станины.....	47
6.2.1 Расчет швеллера на сопротивление изгибу.....	47
6.2.2 Расчет шпильки на растяжение.....	48
6.3 Расчет вала.....	49
6.4 Расчет подшипника качения.....	50

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	52
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	53

ВВЕДЕНИЕ

Машина для непрерывного литья полосы в валковых кристаллизаторах – это машина, служащая для непрерывной разливки жидкого металла через валки-кристаллизаторы в готовую продукцию - полосу. В валках-кристаллизаторах последовательно происходят процессы охлаждения, кристаллизации жидкого и пластической деформации (прокатки) закристаллизовавшегося металла. Главные преимущества данных машин перед другими технологиями производства полос:

- малая энергоемкость;
- высокая экологическая чистота производства;
- малые капитальные и эксплуатационные затраты.

Цель настоящей работы является разработка опытной установки непрерывного литья цинковых полос и в дальнейшем реализации процесса рулонной прокатки фольги.

Разработка опытной установки для литья цинковых полос позволит исследовать температурно-скоростные параметры процесса.

1 ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОС НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКОЙ

Получение полос в валковых кристаллизаторах осуществляется следующим образом: в зазор между двумя вращающимися охлаждаемыми валками заливают жидкий металл; на поверхностях валков кристаллизуются корочки металла, которые после их соединения образуют сплошную полосу, которая в этих же валках-кристаллизаторах подвергается пластической деформации - прокатке.

Технология производства полос с применением валкового литейно – прокатного агрегата называется бесслитковой прокаткой [1].

Но для применения данной технологии необходимо производить анализ пластической деформации полосы, который сильно отличается от обычной продольной прокатки. Важно определить критерии выбора основных параметров валкового агрегата, в частности, диаметра валков-кристаллизаторов. Необходимы новые подходы к определению сопротивления деформации металла и уширения полосы с учетом особенностей бесслитковой прокатки. Следует получить решения по повышению эффективности охлаждения валков-кристаллизаторов, гарантирующие получение стальных полос высокого качества.

При бесслитковой прокатке в валковых кристаллизаторах наиболее важными являются 3 задачи, непосредственно связанные с валковыми кристаллизаторами:

- температурная задача;
- определение толщины стенки банджа;
- обоснование выбора диаметра валков-кристаллизаторов.

1.1 Этапы развития непрерывной разливки полос

Первые известные схемы установок для непрерывного литья полос [2] :

Каждая из представленных ниже машина реализует главную идею бесслитковой прокатки:

- получение полос непосредственно из жидкого металла путем его заливки в кристаллизатор с движущимися стенками;

- получение в компактной установке тонких полос, приближающихся по толщине к готовой продукции.

1 - Установка роторного типа:

Процесс кристаллизации металла происходит в зазоре между литейным колесом и металлической бесконечной лентой, охватывающей его как шкив (рисунок 1.1);

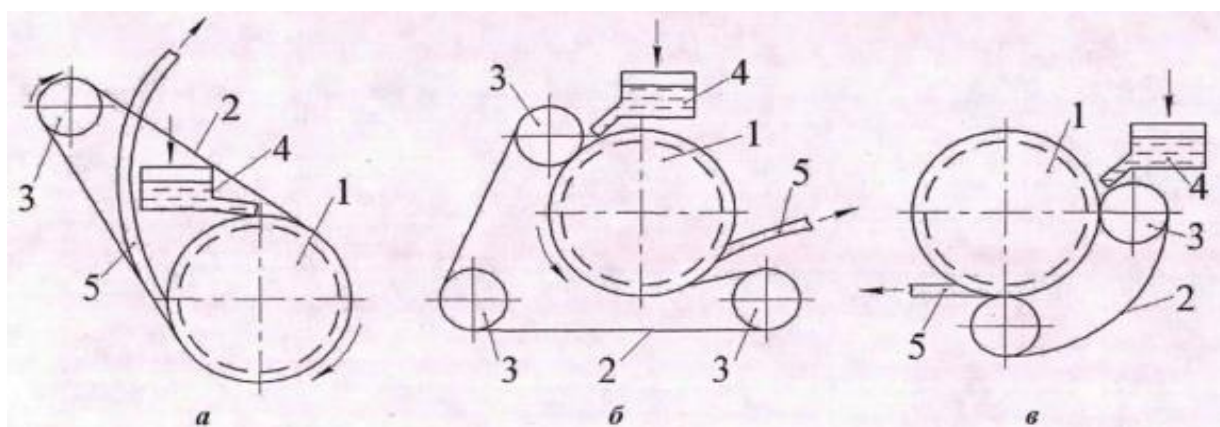


Рисунок 1.1 – Роторные кристаллизаторы: а – Проперзи; б – Спайдем; в –

Портфаилд:

1 – ротор; 2- лента; 3 – натяжные ролики; 4 – заливочная чаша; 5 – литая заготовка

Принцип работы данной установки заключается в следующем. Металл из заливочной чаши 4 поступает в зазор между литейным колесом и лентой 2, где происходит пластическая деформация и получение готовой полосы 5, колесо в свою очередь приводит в движение ротором 1. Для натяжения ленты используются натяжные ролики 3.

2 - Установка ленточного типа:

Кристаллизатором служат две бесконечные ленты с устройствами их охлаждения.

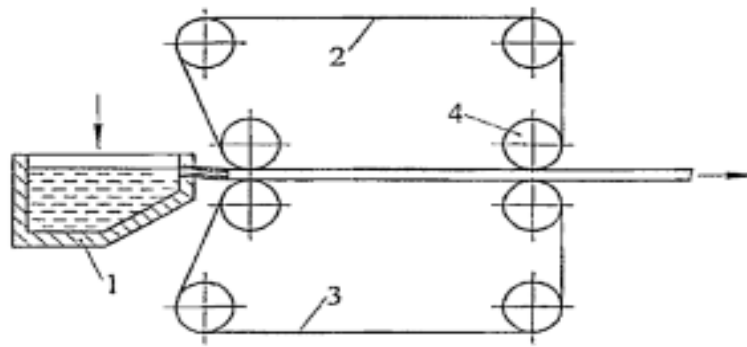


Рисунок 1.2 – Ленточный кристаллизатор Hazellet:

1 – заливочная чаша; 2 и 3 – верхняя и нижняя половины ленточного кристаллизатора; 4 – натяжные барабаны

Принцип работы устройства: металл из заливочной чашы 1 проходит между верхней и нижней лентой 2 и 3, где и происходит процесс кристаллизации металла. Ленты 2 и 3 приводятся в движение натяжными-приводными барабанами 4 (рисунок 1.2);

3 - Установка валкового типа:

Кристаллизация металла и последующее обжатие затвердевшей полосы (прокатка) происходят между двумя вращающимися охлаждаемыми валками-кристаллизаторами 1 (ВК) (рисунок 1.3).

Принцип работы устройства состоит в следующем. Валковый кристаллизатор содержит валки 1 с системой внутреннего охлаждения, в которые из промежуточного ковша (не показано на рисунке) поступает расплавленный металл, каждый из которых оснащен ребордой 2, которая служит для

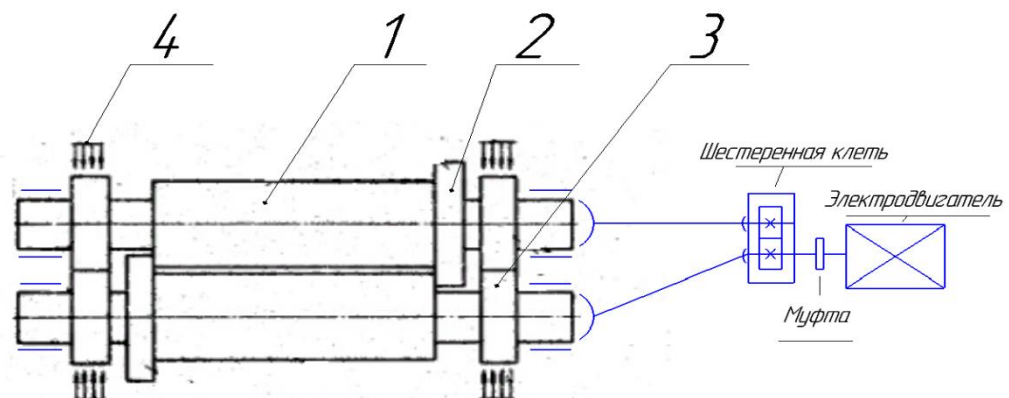


Рисунок 1.3 – Валковый кристаллизатор

предотвращения выхода металла за пределы рабочей поверхности валков, тем самым предотвращая попадания металла на цилиндрические упоры 3 и позволяющие создать ванну необходимой высоты. Цилиндрические упоры 3 удалены на одинаковое расстояние от торцов валков. Каждый из упоров оснащен горелкой 4. Наличие цилиндрических упоров 3 позволяет получать полосу постоянно толщины за счет создания между валками зазора необходимой величины. Для получения полосы постоянной толщины цилиндрические упоры 3 оснащены горелками 4 в целях поддержания средней температуры бочек валков и упоров одинаковой. Далее готовая полоса сматывается на моталку или режется.

При этом только в установках валкового типа реализуется собственно так называемая «беслитковая прокатка»; процесс в установках роторного и ленточного типов правильнее относить к «непрерывному литью полос» в кристаллизатор с движущимися стенками (хотя иногда и эти установки относят к беслитковой прокатке).

Установки валкового типа (подача металла осуществляется снизу (рисунок 1.4) и подача металла осуществляется сбоку) (рисунок 1.5) [3]

Данную установку применяют для литья полосы из алюминия и цинка.

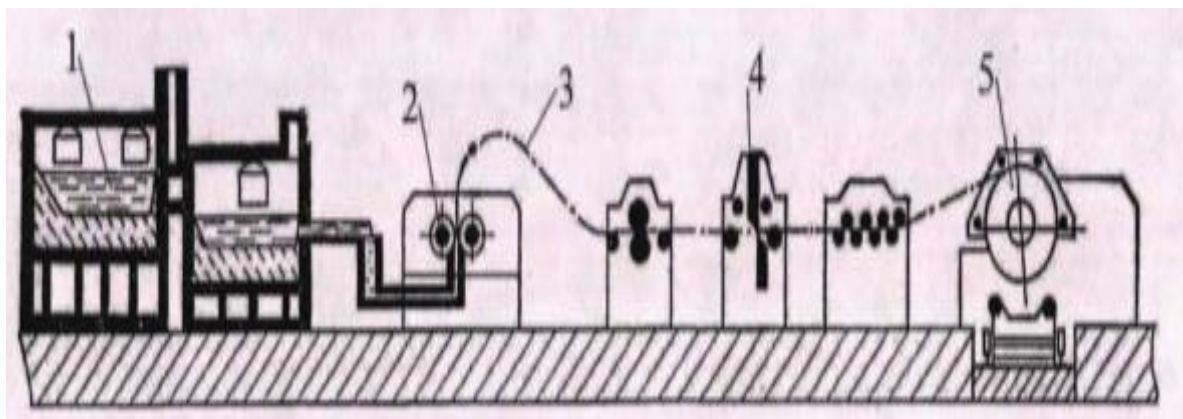


Рисунок 1.4 – Схема установки для литья алюминиевых сплавов в двухвалковых агрегатах при подаче металла снизу

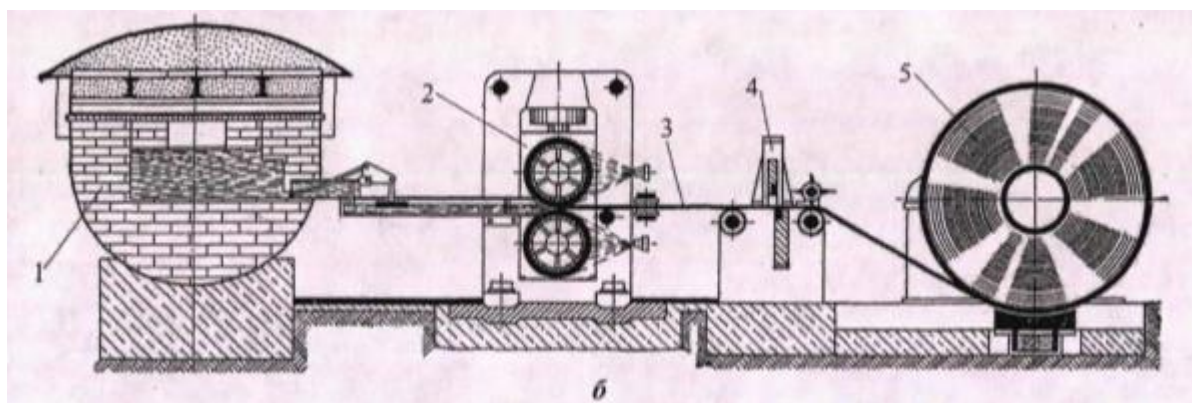


Рисунок 1.5 – Схема установки для литья алюминиевых сплавов в двухвалковых агрегатах при подаче металла сбоку

Принцип работы данных установок заключается в следующем. Металл из ковша 1 поступает в промежуточный ковш, из которого подается между валками кристаллизаторами 2, в которых происходит пластическая деформация и кристаллизация металла. Далее готовую полосу разрезают на листы ножницами 4 или сматывают в рулоны на моталке 5. В состав линии агрегата входит тянущая клетка (валки) и поддерживающий ролик.

4 - Устройство валкового литейно-прокатного агрегата (для беслитковой прокатки стальных полос) [4]

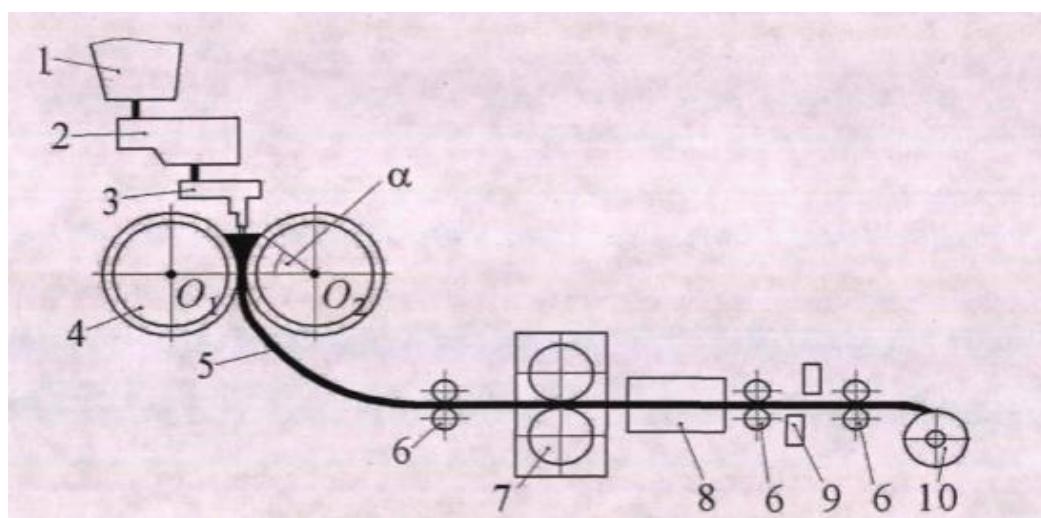


Рисунок 1.6 – Общая схема состава оборудования технологической линии с валковым ЛПА для производства тонких стальных полос

Принцип работы данного устройства заключается в следующем. Из ковша 1 жидкий металл заливают в промежуточный ковш 2, а из него через разливочное устройство 3 в валковый кристаллизатор 4. Полосу 5 после литейно-прокатного агрегата подвергают дополнительному обжатию в валках прокатной клетки 7, а после прохождения участка охлаждения (термообработки) 8 полосу разрезают на листы ножницами 9 или сматывают в рулоны на моталке 10. В состав линии агрегата входят несколько тянущих клетей (валков) 6.

Если подачу металла рассматривают относительно плоскости, проходящей через оси ВК, то различают вертикальную (рисунок 1.4 и рисунок 1.6) и горизонтальную (рисунок 1.5) подачи. В некоторых случаях горизонтальную подачу металла осуществляют при установке рабочей клетки с валковым кристаллизатором с наклоном в сторону подачи (например, на 15° по проекту фирмы FATA Hunter).

1.2 Состояние технологии и технико – экономическая эффективность непрерывной разливки полос

В последние 15-20 лет к технологии бесслитковой прокатки привлечено особое внимание во многих странах, включая Россию, как к современному средству производства качественных тонких полос из различных металлов и сплавов.

Многолетние НИОКР, выполненные в России и за рубежом, привели к созданию ряда экспериментальных, опытно-промышленных и промышленных валковых ЛПА для производства тонких полос. Эти работы (см., например, [5 - 10]) окончательно доказали высокую эффективность технологии валковой отливки тонких широких полос из сталей разных марок.

В Европе современные основы литья тонких полос из различных металлов и сплавов в валковом кристаллизаторе были разработаны фирмой Usinor (Франция) при участии Французского института черной металлургии (Irsid) и фирмой ICrapp

Thyssen Stahl (KTS, Германия) при участии Института обработки давлением Рейн-Вестфальского высшего технического училища (RWTH, г. Аахен, Германия). После строительства в 1991 г. крупномасштабного опытно-промышленного вертикального ЛПА на заводе в г. Исберг фирмы Ugine (Франция) были начаты первые опыты по разливке стали.

В результате исследований, проведенных ведущими металлургическими и машиностроительными компаниями [6 - 10], были созданы основы промышленной технологии производства тонкой полосы на вертикальном двухвалковом ЛПА. Компании, занимавшиеся этой проблемой, вначале действовали независимо, затем начали вырабатывать общие программы, объединяя свои производственные мощности, инженерно-технические разработки и ноу-хау.

В Европе результаты исследований фирм KTS и Usinor были объединены с данными фирм Acciai Speciali Terni S. p. A. (AST, Италия) и CSM (Италия), Voest Alpine Industriean Lagenbau (VAI, Австрия): в один европейский проект под названием «Eurostrip» («Европейская-полоса»).

Цель этого проекта заключалась в сооружении в г. Крефельд (Германия) на заводе фирмы Krupp Thyssen Nirosta (KTN, Германия) первой в Европе промышленной установки для литья стальной полосы.

В декабре 1999 г. на заводе в г. Крефельд была разлита первая промышленная плавка коррозионностойкой стали. Устойчиво разливается полный ковш, вместимостью 90 т и ширина полосы составляет 1430 мм. В 2001 г. была пущена в эксплуатацию клеть горячей прокатки, входящая в состав валкового ЛПА. Горячая прокатка в этой клетке с обжатием 20 - 30 % позволила улучшить шероховатость поверхности и структуру полосы.

Специалисты проекта «Castrip» высказали интересные соображения о возможности снижения требований к химическому составу стали, выплавляемой из металлолома. Это связано с тем, что при высокой скорости охлаждения жидкого металла миграция включений к границам зерен затрудняется.

Исследования позволили наметить сортамент агрегата и определить рыночные перспективы новой технологии. По мнению авторов проекта «Castrip» на ВЛПА можно производить полосы толщиной 0,7 - 2,1 мм и шириной 1000 - 2000 мм при скорости литья до 150 м/мин и массе рулона 25 - 40 т. В зависимости от вида продукции производительность ВЛПА составит 60-110 т/ч.

В таблице 1 представлены данные о зарубежных промышленных двухвалковых ЛПА [10].

Таблица 1 – Характеристики зарубежных промышленных двухвалковых ЛПА

Фирма, страна	Поставщик оборудования	Толщина полосы, мм	Ширина полосы, мм	Диаметр валков, мм	Вместимость печи, т
ВНР (Австралия)	ИНИ	2	1345	500	6
Krupp Thyssen Nirosta (Германия)	VAI	1,8 – 4,5	1450	1500	90
AST (Terni, Италия)	InnseNAI	2 – 5	860	1500	65
Acciaierie Bertoli Safau (ABS, Италия)	Danieli	0,8 – 1,8	1500	1400	80
Tangshan Steel of China (Китай)	SMS/MTAG	0,8 – 3,0	Нет св.	Нет св.	Нет св.
Nucor/Castrip (США)	ИНИ/ВНР	2	1345	500	100
Usinor (Франция)	Clecim	2 – 4	865	500	92
Posco (Ю. Корея)	DDL/Posco	2 – 6	1300	1250	10
Nippon Steel (Япония)	Mitsubishi	2 – 5	1330	1200	60
Pacific Metals (Япония)	Hitachi Zosen	2,5 – 5	1050	1200	1
Sumitomo M. (Япония)	Sumitomo M.	1,3 – 3	720	1400	15

В настоящее время разработчики валковых ЛПА для производства тонких стальных полос могут изготовить оборудование, выполненное по следующим проектам:

- «Eurostrip» (фирмы KTS (Германия), AST (Италия), VAI (Австрия), Usinor (Франция));

- «Castrip» (фирмы Broken Hill Proprietary (БНР, Австралия), Ishikawajima Heavy Industries (ИИ, Япония), Nucor (США));
- «SMS Demag и MAIN AG/MTAG» (фирмы SMS Demag AG (Германия), MAIN AG/MTAG - Technologie AG (Швейцария)).

В России научно-исследовательские работы по созданию двухвалковых ЛПА для черной металлургии проводятся в АХК «ВНИИМЕТМАШ им. Академика А.И. Целикова» [11,12]. Ряд интересных работ выполнен фирмой «ОЗМА» (г. Москва) [13] Проводятся также работы в ОАО «Центросвар» (г. Тверь) и в ОАО «Институт Цветметобработка» (г. Москва) в развитие ранее выполненных исследований по бесслитковой прокатке в валковых ЛПА тонких широких полос из алюминиевых и цинковых сплавов..

На опытных двухвалковых ЛПА специалисты ВНИИМЕТМАШ провели комплекс научно-исследовательских работ по БП лент шириной от 150 до 300 мм из различных марок стали. На этих ЛПА отработана технология литья как стальной ленты толщиной 0,1...0,3 мм с микрокристаллической структурой, так и обычной ленты толщиной 1...2 мм. Исследования, показали значительное улучшение свойств тонких лент из различных сплавов на основе железа [11,12].

На основании большого комплекса проведенных исследований и оригинальных конструкторских решений во ВНИИМЕТМАШ'е разработан проект ВЛПА для производства горячекатаной стальной полосы толщиной до 5 мм и шириной до 1000 мм (рисунок 1.7) [11, 12].

Данная установка (рисунок 1.7) состоит из сталеразливочного ковша 1, стопора 2, промежуточного ковша 3, тележки 4, заливочного узла 5, двухвалковой литейно-прокатной машины 6, тракта выдачи полосы 7, тянущей клетки 8, летучих барабанных ножниц 9, прокатной клетки 10, передаточного рольганга 11, барабанных моталок 12, емкости для аварийного слива металла из промежуточного ковша 13 и емкости для аварийного слива металла из створа валков 13.

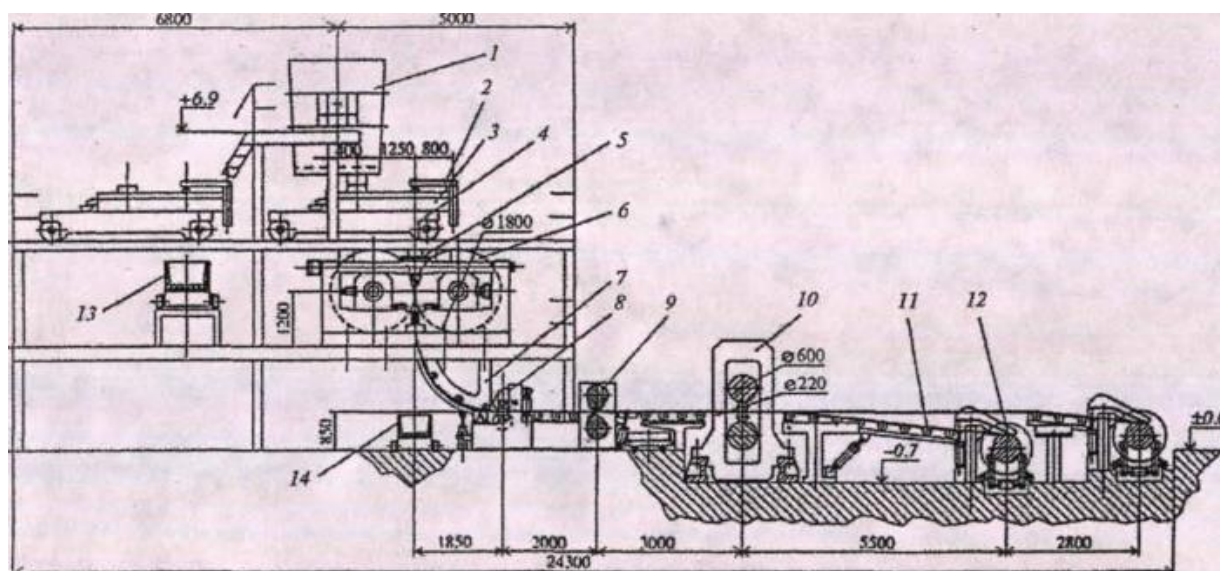


Рисунок 1.7 - Схема расположения оборудования литейно-прокатного агрегата для производства стальной горячекатаной полосы (ВНИИМЕТМАШ им. акад. А.И. Целикова)

Рассмотрим эффективность новой технологии БП тонких полос. В таблице 2 дано сравнение различных способов производства тонких полос. Видно, что технологические и экономические показатели производства полос из толстых и тонких слябов и БП резко отличаются в пользу БП. Беслитковая прокатка тонких полос позволяет существенно снизить производственные затраты, так как при этом требуется меньшее число операций, а потребление энергии и капиталовложений в несколько раз меньше. При БП тонких полос горячая прокатка сведена к минимуму, загрязнение охлаждающей воды и образование твердых шламов значительно меньше; отпадает необходимость в мощных нагревательных печах и многоклетевых станах.

Ориентировочно затраты (в ценах 2000 г.) на сооружение установки «Eurostrip» для выпуска полос из коррозионностойких сталей производительностью 500 тыс. т/год следующие:

Агрегат	Капитальные затраты, млн долл.	Удельные затраты, долл/т
Электропечь	50-65	100-130
БП	60-80	120-170
Всего	110-150	220-300

Таблица 2 - Сравнительная характеристика процессов производства стальных полос из непрерывнолитых заготовок [8, 10, 13]

Техническая характеристика	Агрегаты для производства горячекатаных полос		
	НШПС	тонкослябовые ЛПА	валковые ЛПА
Вид заготовки	Сляб	Тонкий сляб	Тонкая полоса
Толщина заготовки, мм	210 – 250	50 – 90	1 – 3
Масса расплава в кристаллизаторе, т	>5	0,9	<0,4
Скорость литья заготовки, м/мин	0,9 – 2,2	6	60 – 150
Средняя скорость охлаждения, °С/с	12	50	1700
Производительность, млн т/год	2 – 4	1 – 1,5	0,5
Протяженность технологической линии, м	500 – 800	300 – 400	60 (Castrip) 150 (Eurostrip)
Занимаемая площадь, тыс. м ²	105	18	8 (Eurostrip)
Коэффициент расхода жидкой стали	1,14 – 1,22	1,13	1,01
Удельные трудозатраты, чел. ч/т	4 – 12	1 – 2	0,5 – 1
Энергозатраты, ГДж/т продукции	0,8 – 1,8*	0,4	0,2
Административные и транспортные расходы	Высокие	Низкие	Весьма низкие
Выбросы CO ₂ , т на 1 т продукции	0,2	0,14	0,04
Начальные капиталовложения, млн долл.	>1500	800	130 – 200
* В зависимости от температуры погрузки слябов в печь.			

Разработчики технологии «Castrip» считают, что на сооружение завода по производству горячекатаной полосы их способом требуется 200 млн долл.

Обычно на металлургических агрегатах удельные затраты на передел уменьшаются с ростом объема производства. Однако, в случае БП удельные затраты на передел на агрегатах типа «Castrip» и «Eurostrip» производительностью всего 0,5 млн т/год будут примерно такими же, как и на тонкослябовом агрегате

типа «CSP» («Compact Strip Production») производительностью 2 млн т/год или на заводе, работающем по традиционной технологии, производительностью 3 млн т/год.

Разработчики проекта «Eurostrip» отмечают преимущества процесса БП [14]:

- снижение капитальных затрат на 77 % по сравнению с традиционной технологией и на 68 % по сравнению с тонкослябовой технологией;
- снижение удельных капиталовложений, соответственно, на 45 и 35 %;
- производственные площади (включая инфраструктуру) составляют всего 15 % от площадей, требуемых при традиционной, и 40 % - при тонкослябовой технологии;
- расход энергии меньше на 1,4 ГДж/т по сравнению с традиционной технологией и вдвое меньше по сравнению с тонкослябовой технологией;
- выделения в атмосферу SO₂, CO₂, NO_x, снижаются на 70 - 90 %.

При традиционном непрерывном литье и горячей прокатке с уменьшением толщины полосы снижается производительность из-за физических ограничений горячей прокатки. В процессе БП по самой его сути имеем другое положение: с уменьшением толщины полосы ее скорость выше и соответственно выше производительность агрегата.

1.3 Современный уровень научных исследований по непрерывной разливке тонких полос

Сравним в общих чертах схемы формирования плоского слитка в процессе непрерывной разливки стали. При литье в установке непрерывной разливки стали (УНРС) слябов больших толщин (100 - 300 мм для стали) жидкий металл 1 подают в плоский кристаллизатор через воронку 2 под уровень мениска жидкого металла; при этом мениск защищен слоем шлаковой смеси 3 (рисунок 1.8). В кристаллизаторе 4 формируется корка $\delta(\tau)$ (τ - время) твердого слитка 5. Струя

жидкого металла удалена от стенок кристаллизатора и на них не попадает, проникая вглубь слитка, как показано стрелками на рисунке 1.8.

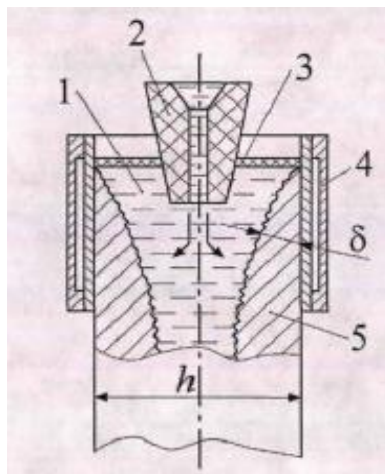


Рисунок 1.8 – Схема формирования непрерывного слитка в обычном кристаллизаторе УНРС

У ЛПА – литейно – прокатного агрегата (рисунок 1.9) в ВК – валковом кристаллизаторе происходит равномерная подача расплавленного металла из промежуточного ковша 1 по всей ширине полосы через направляющую 2 под уровень миниска, данная технология представляет очень трудную задачу. Между валков 3 и 4 происходит формирование тонкой полосы 5 при очень высоких скоростях, а это значит следующее, что за 1 секунду контакта с ВК образуется твердая корка толщиной приблизительно в 1 мм.

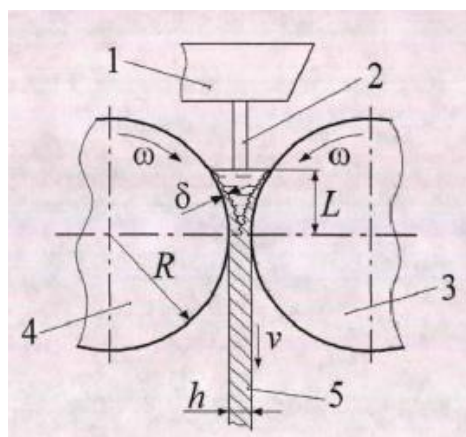


Рисунок 1.9 – Схема формирования тонкой полосы в валковом кристаллизаторе ЛПА: δ – текущая толщина корки слитка (полосы); ω – угловая скорость валков; v – линейная скорость выхода полосы; L – протяженность очага кристаллизации-деформации; R – радиус валков

Отличие указанных схем состоит в следующем:

- в случае УНРС кристаллизация металла заканчивается не в самом кристаллизаторе, а вне его на длине в несколько метров;
- в случае В ЛПА на длине в 100-300 мм кристаллизация не только заканчивается полностью, но и на этой длине происходит пластическая деформация (прокатка) сформированной тонкой полосы.

Скорости образования сляба и тонкой полосы также резко отличаются: от десятков минут в случае УНРС до долей секунды или нескольких секунд - в случае ВЛПА.

Главное принципиальное отличие заключается в том, что совмещение процессов кристаллизации и деформации полосы в одном очень коротком ОКД приводит к сильному влиянию этих процессов друг на друга не только с точки зрения получения качественного продукта, но и возможности осуществления самого процесса.

Малая протяженность ОКД создает огромные трудности в обеспечении стабильности как процессов разливки и кристаллизации металла, так и прокатки затвердевшей тонкой полосы. Опасения в невозможности обеспечения стабильности процессов БП в промышленных условиях являются пока серьезным препятствием на пути широкого и активного распространения высокоэффективного процесса БП, например, в черной металлургии.

Многие теоретические и технологические проблемы БП полос в первую очередь связаны с формированием в ОКД тонкого слитка (полосы) из жидкого металла, т.е. с анализом закономерностей роста корки δ затвердевшего металла (рисунок 1.9) во времени с учетом многочисленных факторов, влияющих на процесс роста корки.

1.4 Конструкции валков – кристаллизаторов

В технологии производства тонких полос в валковом литейно-прокатном агрегате (ВЛПА) особая роль принадлежит валкам-кристаллизаторам (ВК). В валках-кристаллизаторах последовательно происходят процессы охлаждения, кристаллизации жидкого и пластической деформации (прокатки) закристаллизовавшегося металла. Таким образом, ВК одновременно выполняют две функции — кристаллизатора с подвижной «стенкой» и деформирующего инструмента, что обуславливает высокие специфические требования, предъявляемые к ним [4].

Валки-кристаллизаторы сильно влияют на технологический процесс бесслитковой прокатки (БП) и качество полосы. С диаметром ВК связаны скорость выхода полосы и производительность агрегата, а шероховатость поверхности, неравномерность теплового профиля и исходная профилировка ВК в значительной степени определяют качество полосы. В свою очередь режимы и условия самого процесса БП (система и эффективность охлаждения, смазка и др.) оказывают влияние на стойкость ВК и могут заметно повлиять на экономику производства полос.

Многочисленные известные конструкции ВК [1 - 4] состоят в основном из оси и соединенного с ней (горячей посадкой, механическим путем и др.) бандажа (рисунок 1.10). Различные конструкции, как видно, отличаются способами подачи, распределения по охлаждаемой поверхности и отвода охлаждающей воды. Водоохлаждающие каналы на внешней поверхности оси могут быть продольными, наклонными, кольцевыми; подача и отвод воды могут осуществляться и с одной, и с двух сторон ВК.

Известны патентные проработки и других конструкций ВК, которые, по сравнению с показанными на рисунке 1.10, значительно сложнее и, очевидно, дороже в изготовлении и эксплуатации ([6]). В конструкции [6] предусмотрены многочисленные сверления в стенке бандажа по его окружности и по всей длине

бочки (для циркуляции охлаждающей воды), что трудно выполнить при длине бочки в 1,5 - 2,0 м.

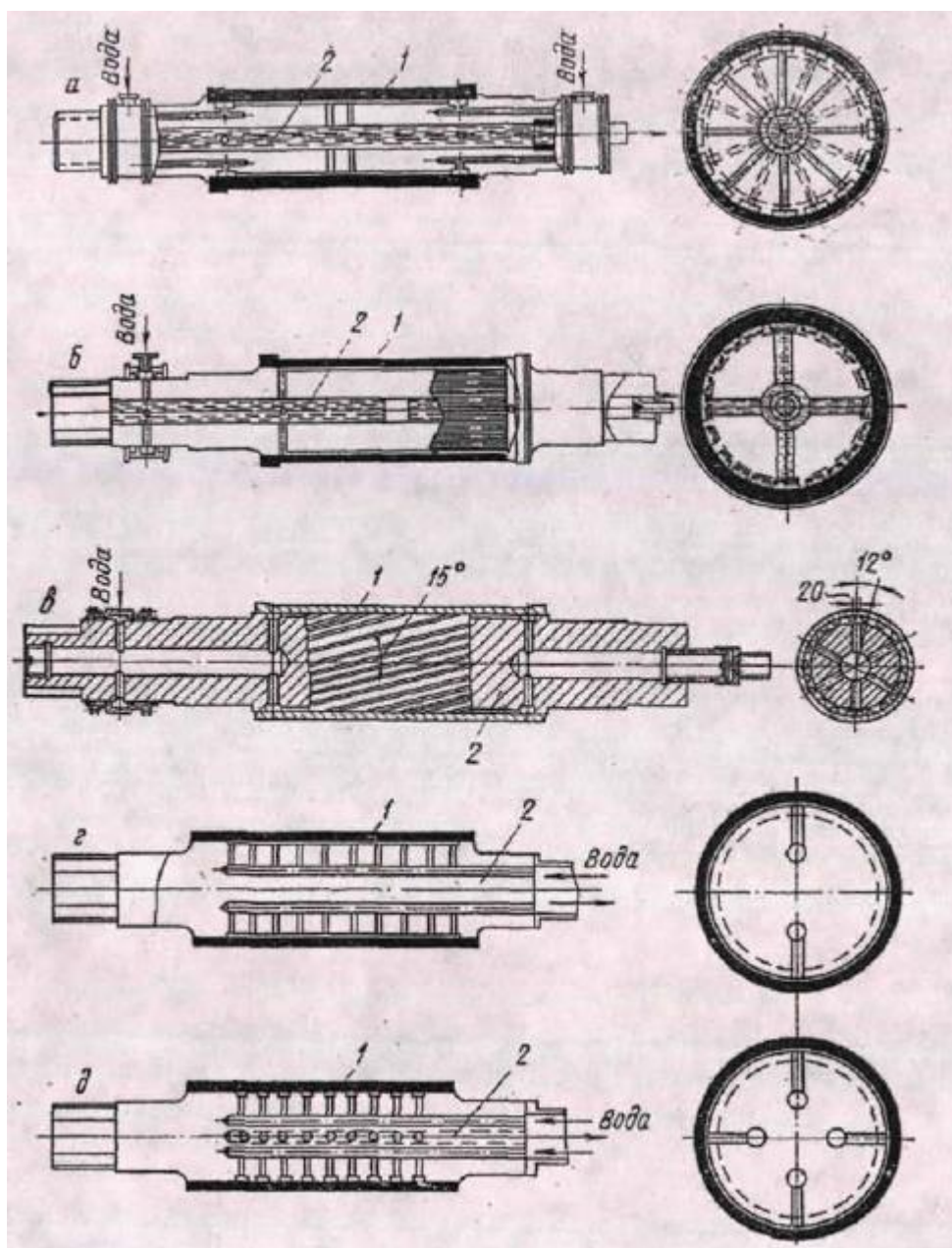


Рисунок 1.10 - Конструкции валков-кристаллизаторов [4]: а - конструкции Ленинградского завода ОЦМ с подводом воды с двух сторон (с продольными каналами); б — то же, с подводом воды с одной стороны; в — то же, с наклонными каналами; г - конструкции фирмы «Хантер-Энжиниринг»; д - конструкции фирмы «Пешине»; 1 - бандаж; 2 - ось

На сегодняшний день и практика эксплуатации ряда ВЛПА, и исследовательские работы указывают на то, что в случае БП полос предпочтение надо отдавать меди и бронзе в качестве материалов бандажей ВК. В этой связи особый интерес представляют разработки А.К. Николаева (ОАО «Институт Цветметобработка»), посвященные созданию жаропрочных теплопроводных медных сплавов для теплообменников различного типа, в том числе для кристаллизаторов установок непрерывной разливки стали [8, 9].

Анализ результатов работ, посвященных БП полос, показал, что наиболее острыми остаются 3 задачи, непосредственно связанные с ВК:

- 1 - температурная задача;
- 2 - определение толщины стенки бандажки;
- 3 - обоснование выбора диаметра ВК

1.5 Целесообразность использования непрерывной разливки полос в условиях ООО НПО «РосАнтикор»

В последние годы в связи с прекращением зарубежных поставок металлопродукции, например свинцовой и цинковой фольги, различного сортамента, отечественные предприятия разрабатывают технологии и оборудование для их производства. К числу таких предприятий относится ООО Научно – Производственное Объединение «РосАнтикор» г. Челябинск. Предприятие в своем составе имеет литейное, прокатное и прессовое оборудование. Прокатное оборудование включает в основном два стана ДУО – 1400 НКМЗ с диаметром рабочих валком 710 мм. На данных станах осуществляется полистная реверсивная прокатка полос из меди, цинка, свинца толщиной до 0,5 мм и шириной до 1000 мм из подката 50-100мм.

В настоящее время отечественные электротехническая, автомобильная и другие виды промышленности остро ощущают дефицит цинковой фольги толщиной 0,05 – 0,1 мм. Для её производства в ООО НПО «РосАнтикор»

планируется разработка нового прокатного стана, обеспечивающего рулонную прокатку фольги толщиной 0,05 – 0,1 мм и шириной 145мм из подката толщиной 2 – 3 мм. Однако имеющееся в ООО НПО «РосАнтикор» оборудование не позволяет получить исходную заготовку в виде рулона. В связи с этим рассматривается вариант получения исходной полосы в рулоне с использованием технологии непрерывной разливки цинковой фольги толщиной 2 – 3 мм и шириной до 300 мм.

Реализация такой технологии позволит существенно снизить затраты на производство цинковой фольги, т.к. в этом случае отпадает необходимость разливки цинка в слябы и последующей их прокатки на стане ДУО – 1400. Исключается 2 – 3 термообработки для снятия наклепа цинка в процессе прокатки.

Разработку опытной установки и отработку технологии непрерывной разливки цинковых полос планируется выполнить в условиях ЮУрГУ. В дальнейшем данную установку с учетом доработки для промышленного использования планируется установить на предприятии ООО НПО «РосАнтикор».

2 ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ ПОЛОС

Выбор параметров опытной установки напрямую связан с уже имеющимся в лаборатории оборудованием. Так как для осуществления процесса получения готовой продукции будет использоваться уже имеющееся, а главное установленное в проектное положение оборудование это: привод, рама, трайбаппарат, моталка, система охлаждения, промежуточный ковш, то имеются жесткие ограничения по выбору параметров разрабатываемой машины и металла из которого будет получаться готовый продукт. Разрабатываемая машина для непрерывного литья полосы будет напрямую привязано к имеющемуся оборудованию.

Основываясь на анализе уже имеющегося оборудования, было принято решение в качестве исходного металла для получения готовой полосы использоваться цинк, так как нагреватель имеет максимальную температуру нагрева 600°C , а температура плавления цинка составляет $419,5^{\circ}\text{C}$.

В связи с тем, что имеются жесткие рамки по габаритным размерам, разрабатываемой машины, было принято решение сконструировать прокатные валки кристаллизаторы с внутренним охлаждением со следующими параметрами: диаметр бочки валка 250 мм, ширина бочки валка 145 мм (в качестве материала бандажа валка будет использована медь, так как она имеет хорошую теплопроводность, что позволит хорошо отводить тепло). Данные параметры валков позволят осуществлять получение цинковой полосы со следующими характеристиками: ширина полосы 145 мм и толщина 2 мм. В последующем, полученные непрерывной разливкой полосы использовать для прокатки фольги толщиной до 0,05 мм на опытном стане ХПЛ – 200 ЮУрГУ.

Исходя из анализа литейных машин тонких полос, опытная установка должна иметь промежуточный ковш с устойчивым выпуском металла из него. Промежуточный ковш должен быть подогреваемым до температуры $500 - 600^{\circ}\text{C}$,

так как при проведении опытных работ возможна задержка транспортирования полосы до моталки. В этом случае должно быть исключено застывание металла в промежуточном ковше.

Скорость вращения валков и соответственно скорость литья должна быть регулируемой. Это обеспечивается имеющейся на стане системой регулирования скоростным режимом вращения валков.

Валки опытной установки непрерывной разливки полосы должны быть водоохлаждаемыми.

3 РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ ЦИНКОВЫХ ПОЛОС

Для того, чтобы произвести расчет энергосиловых параметров необходимо изначально определить скорости разливки, чтобы убедиться будет ли возможен процесс непрерывной разливки полосы.

Определение скорости разливки является важной частью работы машины, так как если скорость разливки будет превышать критическую скорость, то будет значительное ухудшение качества продукции.

Методика выполнения расчета была взята из работы [15].

Перед проведением расчетов, на основе изучения работы [15], было предложено принять скорость литья полосы равной 0,05 м/с, при диаметре валков 250 мм, и проверить работу машины при заданной скорости.

Таблица 3 – Исходные данные

Ширина полосы, мм	Радиус бочки валка, мм	Конечная толщина полосы, мм	Материал заготовки	Скорость литья полосы, v м/с
145	125	2	Цинк	0,05

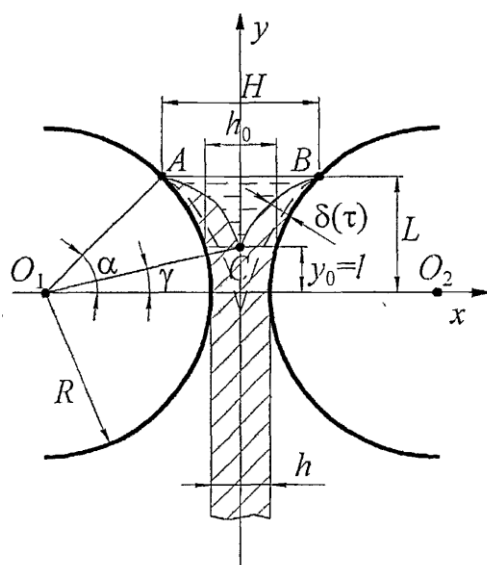


Рисунок 3.1 – Схема к расчету параметров процесса беслитковой прокатки

Уровень мениска металла в жидком состоянии AB относительно плоскости $O_1 - O_2 (y = 0)$, которая проходит через оси валков, определяет угол α (рисунок 3.1). От мениска, иначе говоря от точек A и B происходит процесс кристаллизации жидкого металла, и на рабочих поверхностях обоих валков образуются две твердые корки металла толщиной $\delta(\tau)$, где τ - время.

В случайный момент времени $\tau = \tau_0$ две твердые корки соприкасаются в точке C (где $y = y_0$). Для определения максимальных параметров, при которых прокатка будет возможна угол γ принимаем равным 0° :

$$[R + \delta(\tau_0)] \cdot \cos\gamma = R + 0,5 \cdot h; \Rightarrow \delta(\tau_0) = \frac{R+0,5 \cdot h - R \cdot \cos\gamma}{\cos\gamma} \quad (1)$$

где R – радиус бочки валков, 125 мм;

h – конечная толщина полосы, 2 мм;

γ - угол, соответствующий сечению очага кристаллизации-деформации, где начинается пластическая деформация полосы.

Из уравнения (1) получаем:

$$\delta(\tau_0) = \frac{R+0,5 \cdot h}{\cos\gamma} - R = \frac{125+0,5 \cdot 2}{1} - 125 = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м};$$

где h – конечная толщина полосы (в сечении $y = 0$);

При этом время равно:

$$\tau_0 = \frac{\alpha - \gamma}{\omega}; \quad (2)$$

$\alpha = 20^\circ$ - угол положения мениска жидкого металла.[16]

Далее в расчетах принимаем $\cos 20^\circ = 0.94 = 0,35$ рад.

$$\tau_0 = \frac{\alpha - \gamma}{\omega} = \frac{0,35}{2,64} = 0,13 \text{ с};$$

где ω – угловая скорость валков; $\omega = \frac{v}{R} = \frac{0,05}{0,125} = 0,4 \text{ с}^{-1}$.

Для определения наиболее эффективного угла положения мениска, при расчете ширины мениска жидкого металла H определяем из

соотношения $2R\cos\alpha + H = 2R + h$, используя угол α равный 20° градусам соответственно:

$$H = h + 2 \cdot R(1 - \cos\alpha); \quad (3)$$

$$H = 2 + 2 \cdot 125 \cdot (1 - \cos 20^\circ) = 17 \text{ мм};$$

От точки C ($y = y_0$) начинается пластическая деформация слитка валками, т.е. собственно процесс прокатки.

Длина всей контактной зоны металла с валками L равна:

$$L = \sqrt{R \cdot [H - h]} = R\sqrt{2 \cdot (1 - \cos\alpha)} = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\alpha}{2}; \quad (4)$$

$$L = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 2 \cdot 125 \cdot \sin \frac{20^\circ}{2} = 43.4 \text{ мм};$$

Расстояние зоны, где происходит пластическая:

$$l = \sqrt{R \cdot (h_0 - h)}; \quad (5)$$

где $h_0 = 2 \cdot \delta(\tau_0)$ – находится путем подстановки значений в уравнение (1), для чего следует принять конкретное выражение для функции $\delta(\tau)$. Величина h_0 - это толщина полосы в сечении, проходящем через точку C , т.е. при $y = y_0$.

Подставим в уравнение (5) $h_0 = 0,002$ м :

$$l = \sqrt{0,125 \cdot (0,002 - 0,002)} = 0;$$

отсюда следует, что при критическом угле $\gamma = 0^\circ$ пластическая деформация не осуществляется и полученная полоса может иметь большую разнотолщинность.

Предельная по устойчивости толщина полосы будет равна:

$$h_y = (4,0 \div 4,5) \cdot 10^{-3} \cdot b, \quad (6)$$

где b - ширина полосы, которая равна 145 мм.

$$h_y = (4,0 \div 4,5) \cdot 10^{-3} \cdot 145 = 0,616 \text{ мм}$$

Расчет протяженности зон кристаллизации и деформации:

Возможность осуществления процесса при $\gamma > 0$ невозможна без обоснованного определения угла γ и знания зависимости толщины корки слитка δ слитка от времени τ .

С учетом того, что при бесслитковой прокатке время затвердевания мало, в работе [16] предложено использовать следующую формулу расчета толщины корки слитка, М.Я. Бровмана и А.В. Царева [17]:

$$\delta(\tau) = \sqrt{x_0^2 + 2 \cdot k \cdot \tau} - x_0, \quad (7)$$

где k и x_0 – постоянные величины для цинка, k – постоянная, аналогичная коэффициенту кристаллизации и имеет следующую размерность $\text{м}/\text{с}^2$;

x_0 – постоянная величина, которая выражается в м, она определяет закономерности по увеличению толщины корки полосы в начальные моменты кристаллизации.

В таблице 4 приведены необходимые значения коэффициентов для расчетов.

Таблица 4 – Коэффициенты k и x_0 для металлов и сплавов [17]

Металл (сплав)	$k \cdot 10^{-5}, \text{ м}/\text{с}^2$;	$x_0 \cdot 10^{-3}, \text{ м}$
Углеродистые стали	0,44 ÷ 1,1	3,1 ÷ 6,2
<u>Цинк</u>	<u>0,8 ÷ 1,8</u>	<u>3,0 ÷ 7,0</u>
Алюминий	1,85 ÷ 2,75	4,3 ÷ 7,9

Подставив уравнение (7) в (1) и с учетом (2) получим систему уравнение:

$$\alpha - \gamma = \frac{\omega R^2}{2k \cos^2 \gamma} \cdot \left[\left(1 + \frac{h}{2R} \right)^2 - \cos \gamma \cdot \left(2 + \frac{h}{R} - \frac{x_0}{R} - \frac{hx_0}{R} \right) + \cos^2 \gamma \cdot \left(1 - \frac{x_0}{R} \right) \right]. \quad (8)$$

Подставив $\gamma = 0$ в уравнение (8), получаем формулы для определения критических (предельных) скоростей:

$$\text{- угловой скорости валков: } \omega_k = \frac{2 \cdot k \cdot \alpha}{h \cdot (0,25 \cdot h + x_0)}; \quad (9)$$

Для $h = 2 \text{ мм} = 0,002 \text{ м}$ и угле $\alpha = 20^\circ$;

при $k = 0,80 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$, $x_0 = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

$$\omega_k = \frac{2 \cdot 0,80 \cdot 10^{-5} \cdot 0,35}{0,002 \cdot (0,25 \cdot 0,002 + 3,0 \cdot 10^{-3})} = 0,8 \text{ с}^{-1};$$

$$\text{-линейной скорость полосы: } v_k = \omega_k \cdot R. \quad (10)$$

$$v_k = 0,84 \cdot 0,125 = 0,105 \text{ м/с};$$

На основании полученных данных можно сделать вывод, что выбранная вначале скорость полосы удовлетворяет условию работы машины и не превышает v_k – критическую скорость литья, так же как и $\omega_k > \omega$. На основании чего можно сделать вывод, что при данной скорости литья полосы и угловой скорости валков будет успевать образовываться твердая корка металла, которая в последствии будет обжиматься валками до необходимой толщины 2 мм.

На основе полученных данных производим расчет энергосиловых параметров (контактное давление, усилия, моменты и мощность прокатки) при пластичной деформации полосы в процессе БП и удостоверяемся, удовлетворяют ли они используемому приводу данной установки.

Схема реализации цинковой полосы, когда жидкий металл заливают сверху в зазор между валками-кристаллизаторами показано на рисунке 3.1.

Для получения корректных данных необходимо определить угол γ :

$$\gamma = \frac{k}{x_0 v} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{x_0^2 \cdot v_0^2}{k^2} \cdot \left(\frac{2 \cdot k \cdot \alpha}{x_0 \cdot v} - \frac{h_0}{R} \right)} - 1 \right]; \quad (11)$$

Подставим известные значения в уравнение (11):

$$\frac{0,8 \cdot 10^{-5}}{3,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{(3,0 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,05^2}{(0,8 \cdot 10^{-5})^2} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,35}{3,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05} - \frac{0,002}{R0,125} \right) - 1} \right]$$

$$= 0,102 \text{ Рад};$$

$$\gamma = 5,845^\circ$$

Среднее контактное давление p_{cp} — основной энергосиловой показатель процесса бесслитковой прокатки, который определяет не только усилие прокатки, но и стойкость валков, находим из соотношения:

$$p_{cp} = \sigma \cdot n_\sigma, \quad (12)$$

где σ - сопротивление пластической деформации металла, МПа

$$\sigma = 25 \text{ МПа} [15];$$

где n_σ - коэффициент напряженного состояния, учитывающий влияние трения, внешних зон и натяжения полосы.

Коэффициент напряженного состояния n_σ для случая прокатки тонких полос определяем по:

$$n_\sigma = 0,75 + 0,25m, \quad (13)$$

$$\text{где } m = \frac{l}{0,5(h_0+h)}, \quad (14)$$

где l - длина зоны пластической деформации (прокатки) полосы, м;

h_0 - начальная толщина полосы в сечении γ , соответствующая окончанию процесса затвердевания металла и началу процесса прокатки, м.

Согласно рисунку 3.1, начальная толщина полосы h_0 равна:

$$h_0 = h + 4 R \sin^2 \frac{\gamma}{2}. \quad (15)$$

Подставив значения в уравнение (15), получим:

$$h_0 = 0,002 \text{ м} + 4 \cdot 0,125 \text{ м} \cdot \sin^2 \frac{5,845^\circ}{2} = 0,002 \text{ м} + 0,5 \text{ м} \cdot \sin^2 2,925^\circ =$$

$$0,002 \text{ м} + 0,5 \text{ м} \cdot 0,045^2 = 0,002 \text{ м} + 0,5 \text{ м} \cdot 0,002 = 0,002 \text{ м} + 0,001 \text{ м} =$$

$$0,003 \text{ м}.$$

Длина зоны пластической деформации l составит:

$$l = \sqrt{R(h_o - h)}. \quad (16)$$

Подставив значения в уравнение (16), получим:

$$l = \sqrt{0,125 \text{ м}(0,003 \text{ м} - 0,002 \text{ м})} = \sqrt{0,125 \text{ м} \cdot 0,001 \text{ м}} = \sqrt{0,000125 \text{ м}} \\ = 0,0111 \text{ м}.$$

Подставляя полученные значения h_o и l в уравнение (33), получим:

$$m = \frac{0,0111 \text{ м}}{0,5(0,003 \text{ м} + 0,002 \text{ м})} = \frac{0,0111 \text{ м}}{0,5 \cdot 0,005 \text{ м}} = \frac{0,0111 \text{ м}}{0,0025 \text{ м}} = 4,44.$$

Находим значение n_σ из уравнения (2):

$$n_\sigma = 0,75 + 0,25 \cdot 4,44 = 0,75 + 1,11 = 1,86.$$

Среднее контактное давление $p_{\text{ср}}$ из уравнения (12) составит:

$$p_{\text{ср}} = 25 \text{ МПа} \cdot 1,86 = 37,2 \text{ МПа} \approx 3,72 \text{ кг/мм}^2.$$

Усилие прокатки P определяем из соотношения:

$$P = p_{\text{ср}} \cdot F; \quad (17)$$

где F – площадь контактной поверхности, равная:

$$F = b_o \cdot l. \quad (18)$$

Подставляя значения в уравнение (18), находим:

$$F = 145 \text{ мм} \cdot 11,1 \text{ мм} = 1609,5 \text{ мм}^2.$$

Из соотношения (6), получим усилие прокатки:

$$P = 3,72 \text{ кг/мм}^2 \cdot 1609,5 \text{ мм}^2 = 5987 \text{ кг} = 59,87 \text{ кН}.$$

Момент прокатки $M_{\text{пр}}$ находим из соотношения (при отсутствии натяжения полосы):

$$M_{\text{пр}} = P \cdot a; \quad (19)$$

где a – плечо P относительно центра валкового кристаллизатор.

Принимаем, что распределение контактного давления p по длине очага деформации l близко к равномерному; тогда $a = 0,5l$, где $0,5$ – коэффициент «плеча усилия прокатки» P .

Находим $M_{\text{пр}}$ из уравнения (19):

$$\begin{aligned} M_{\text{пр}} &= 5987 \text{ кг} \cdot 0,5 \cdot 11,1 \text{ мм} = 33228 \text{ кг} \cdot \text{мм} = 332280 \text{ н} \cdot \text{мм} \\ &= 332 \text{ н} \cdot \text{м} = 0,332 \text{ кН} \cdot \text{м}; \end{aligned}$$

Мощность прокатки $N_{\text{пр}}$ определяем из соотношения:

$$N_{\text{пр}} = 2 \cdot M_{\text{пр}} \cdot \omega = 2 \cdot M_{\text{пр}} \cdot \frac{v}{R}; \quad (20)$$

где $M_{\text{пр}}$ - момент прокатки на одном валке (по формуле 37);

ω - окружная скорость валков одинакового радиуса r .

Подставляя все значения в уравнение (20), находим $N_{\text{пр}}$:

$$N_{\text{пр}} = 2 \cdot 332 \text{ н} \cdot \text{м} \cdot \frac{0,05 \text{ м/с}}{0,125 \text{ м}} = 664 \text{ н} \cdot \text{м} \cdot 0,4 \text{ с}^{-1} = 265,6 \text{ Вт} = 0,265 \text{ кВт}.$$

Для обеспечения работы установки непрерывного литья полосы подходит, имеющийся в лаборатории электродвигатель марки П71-Усо следующими характеристиками : мощность 19 кВт, номинальная частота вращения вала 1500 мин⁻¹, а также редуктор 1Ц2У-100: с передаточным отношением 5 и допустимым крутящим моментом на выходном валу 350 Нм.

4 ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ ДЛЯ НЕПРЕРВНОЙ РАЗЛИВКИ ПОЛОС

Линия непрерывной разливки полос (ЮУрГУ-15.04.02.2017.228.00.00.00.00.00 СБ) представляет взаимосвязанные между собой агрегаты, для получения цинковой полосы и состоит из установки рабочей клетки 1, её привода, закрепленного на раме 11 при помощи болтового соединения 19, 20, 21, который включает в себя электродвигатель П-71У мощностью 19 кВт и номинальной частотой вращения вала 1500 мин^{-1} с возможностью регулировки оборотов, двухступенчатого цилиндрический редуктора 1Ц2У-100, закрепленного на раме болтовым соединением 16,17,18 с передаточным отношением 5, две упруго - втулочно-пальцевых муфты (МУВП) 2 и 3, комбинированной шестеренной клетки 5, которая установлена на раме 12 и закреплена болтовым соединением 13, 14, 15 с передаточным отношением 41 и двух карданных валов. Моталка 7 создает необходимое натяжение полосы и имеет следующие технические характеристики: ширина барабана 150 мм, диаметр барабана 300 мм, мотор-редуктор МЦ2С-125-31,5-3-111-Ц У3, установлен трайбаппарат 6 со следующими техническими характеристиками: диаметр валков 200 мм, ширина валков 100 мм, МЦ2С-100-31,5-2,2-111-Ц У3, для осуществления прижима верхнего ролика установлен электромагнит ЭМТ-3 с усилием прижима 1,6 кН и ходом якоря 20 мм. Для подачи готовой полосы к трайбаппарату и моталке предусмотрены направляющие 8,9 и 10.

Установка валкового кристаллизатора (ЮУрГУ-15.04.02.2017.228.00.01.00.00.00 СБ), включает в себя клетку рабочую 1 и установленный на нее промежуточный ковш 2, который опирается на опорный лист 11 и крепится к нему болтами 16 и пластиной 26, для предотвращения сдвига промежуточного ковша опорные листы закреплены к рабочей клетки уголком-фиксатором 8 и болтовым соединением 15, 21, 25. Рабочая клетка 1 установлена на швеллер 6 и закреплена к нему болтовым соединением 18, 23, 28. Швеллер 6

опирается на раму 4 и крепится к ней уголком 7 при помощи болтового соединения 20, 24, 29. Установка оборудована системой охлаждения 3 для подвода и отвода воды в валки кристаллизаторы с целью их охлаждения. На раме 4 закреплены при помощи болтового соединения 17, 22, 27 два направляющих ролика 5 для придания нужного направления полосе.

Кристаллизатор валковый (ЮУрГУ-15.04.02.2017.228.00.01.01.00.00 СБ) состоит из узла станины 2 и валковых узлов 1, установленных в держателях подушки 4, последние в свою очередь закреплены к станине 1 болтовым соединением 18, 23.

В клети предусмотрен механизм уравнивания, регулируемого узла валка кристаллизатора, который имеет пружину сжатия 5, которая зафиксированная при помощи колец 8 и гайки 21. Механизм уравнивания состоит из закрепленного на подушке узла валка уголка 12, который в свою очередь при помощи тяг 7 соединен с уголком 13, закрепленном на узле станины 2 при помощи болтового соединения 16, 23, 25. Тяга крепится к уголку 12 при помощи оси 10, продетой через втулку и фиксируется от выпадения планкой 11, которая в свою очередь крепится к уголку 12 винтами. Для предотвращения выхода металла за пределы рабочих зон валков кристаллизаторов предусмотрены боковые ограничители 3, которые опираются на узел станины 2 и плотно прижимаются к валкам при помощи шпилек 14, стянутых гайками 22. Для предотвращения сдвига боковых ограничителей при вращении валков предусмотрены уголки фиксаторы 6, которые закреплены к узлу станины 2 болтовым соединением 15, 20, 24. Один из валковых узлов 1 имеет возможность регулировки зазора при помощи нажимного механизма, состоящего из винта 9 и гайки. Регулирование необходимого зазора между валками осуществляется вручную и работает следующим образом: винт 9 перемещается горизонтально по резьбе гайки и давит на подушки узла валка 1.

Промежуточный ковш подогреваемый (ЮУрГУ-15.04.02.2017.228.00.01.02.00.00 СБ) состоит из двух оснований 3 в которые

вставлены кожух 5 и внутренняя часть корпуса 6, в последней смонтированы для нагрева на разных уровнях шесть ТЭНов. Кожух при помощи уголков 7 и болтового соединения 15, 22 закреплен к основаниям. Во внутреннюю часть корпуса вставлен промежуточный ковш 2 к нижней части которой закреплена болтами 13 и шайбами 21 направляющая 4. Заливочная емкость закреплена на внутренней части корпуса нагревателя шпильками 9, гайками 19 и шайбой 24. Для заливки цинка в промежуточный ковш предусмотрен желоб 10, который закреплен на внутреннем корпусе 6 при помощи правого 12 и левого 11 уголков болтовым соединением 14, 18, 21. Для контроля подачи металла в валки кристаллизаторы предусмотрен стопорный затвор 1.

Узел вала (ЮУрГУ-15.04.02.2017.228.00.01.01.01.00 СБ) состоит из подшипниковых опор и вала (ЮУрГУ-15.04.02.2017.228.00.01.01.01.01 СБ), на который установлен сварной узел 1. В осевом канале вала установлено уплотнительное кольцо 8, в которое вставлена труба 7, по которой поступает вода для охлаждения. Сварной узел состоит из опорной втулки 12, посаженной на вал через шпонку 22, на которой приварены опорные кольца 9 и подводящее кольцо 10, к которому крепится боковой фиксатор 11. На поверхности опорных колец 10 приварена опора бандажа 14. Бандаж 13 крепится боковым фиксатором 11 к подводящему кольцу 10 винтами 16. Для передачи крутящего момента от сварного узла к бандажу 13 предусмотрены штифты 23. Опора вала состоит из радиального сферического двухрядного роликоподшипника 20, между которыми установлено распорное кольцо 3. Подшипник через втулку 2 упирается в торец вала, а с другой стороны через прижимное кольцо 4, затягивается круглой гайкой 18. Подшипники 20 установлены в подушке 6, которые фиксируются крышками 5, последние закреплены к подушке шайбами 21 и болтами 15. Для предотвращения вытекания смазки из подшипниковых узлов с двух сторон в крышках 5 установлены манжеты 19.

Станина валкового кристаллизатора (ЮУрГУ-15.04.02.2017.228.00.01.01.02.00 СБ) состоит из двух полустанин, каждая из которых в свою очередь имеет

швеллеры 1 и 2, соединенных между собой уголками 7 и болтовым соединением 8, 9, 11, а также для восприятия усилия от прокатки дополнительно установлены шпильки 4, закрепленные гайками 10 и шайбами 12. Две полустанины соединены между собой шпильками 3, гайками 10 и шайбами 12. Для предотвращения перекоса полустанин шпильки 3 продеты во втулках 5.

5 ТЕХНОЛОГИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ ПОЛОС НА ОПЫТНОЙ УСТАНОВКЕ

Процесс получения готовой полосы из цинка (рисунок 5.1) со следующими параметрами: толщина полосы 2мм и ширина 145 мм происходит следующим образом. Предварительно расплавленный цинк при температуре ~ 420 °С заливают по желобу 1 в промежуточный ковш 3. Для того чтобы цинк не остывал и не начинал кристаллизоваться заливочная емкость 3 установлена в нагреватель мощностью 3кВт и максимальной температурой нагрева 600 °С, которая поддерживает необходимую температуру для поддержания цинка в расплавленном состоянии. Затем как только промежуточный ковш наполнится необходимым объемом металла открываем стопорный затвор 2. Далее металл

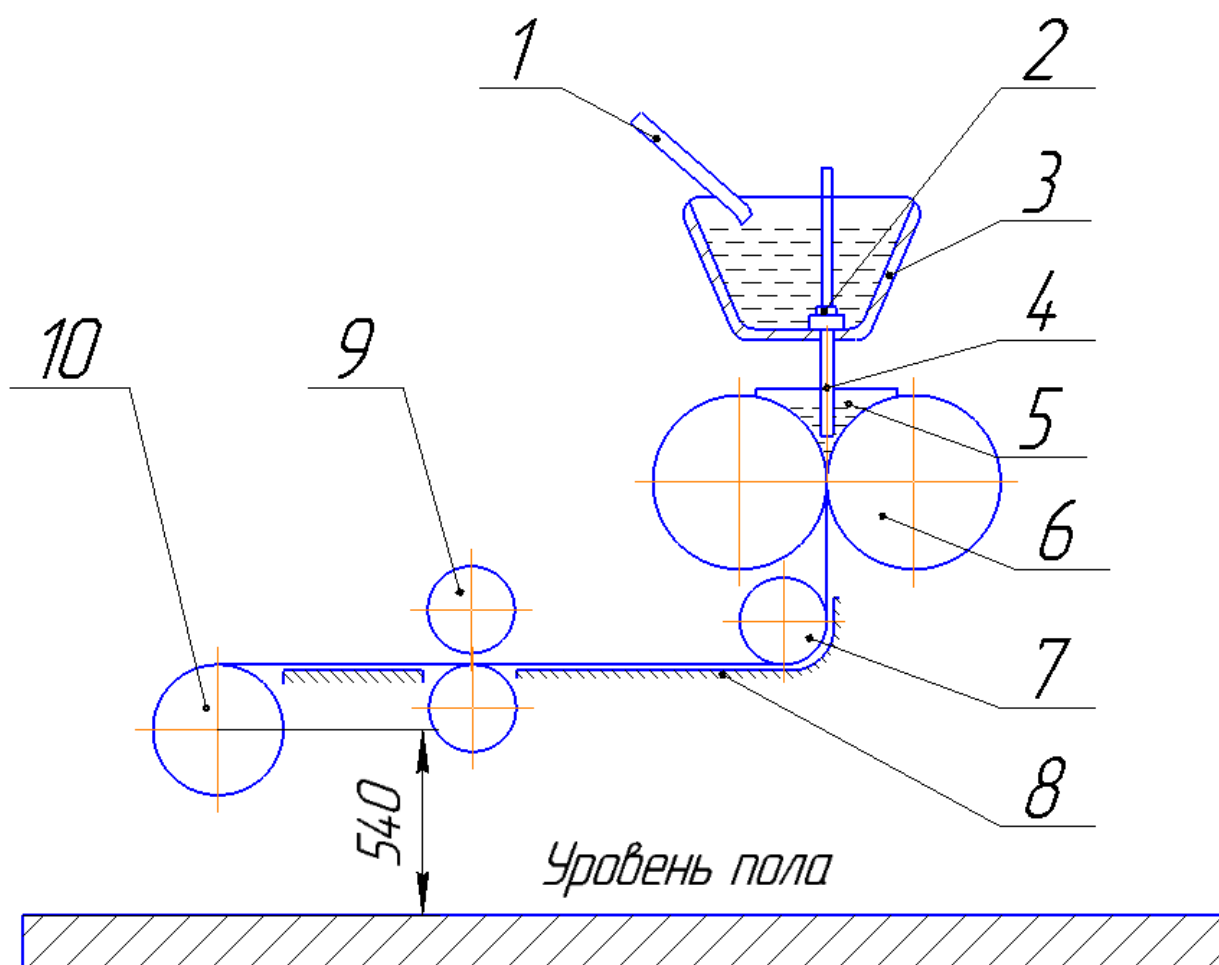


Рисунок 5.1 – Схема установки непрерывного литья цинковых полос

по направляющей 4 поступает в валки кристаллизаторы 6, которые имеют привод, указанный на рисунке 5.2. С торцов валков установлены боковые ограничители 5 для предотвращения выливания цинка за пределы валков. Валковые кристаллизаторы 6 имеют внутренне водяное охлаждение с целью отвода тепла от бочки валка и предотвращения налипания металла на них. Цинк проходя через валки кристаллизаторы 6 кристаллизуется и по направляющей 8 через обводной ролик 7 поступает к трайбаппарату 9. Верхний ролик трайбаппарата 9 прижимается электромагнитом, а нижний приводится в движения от мотор-редуктора, что создает необходимое натяжение полосы и подает полосу на моталку 10. Как только полоса закрепляется на барабане моталки 10, включается привод самой моталки, затем верхний ролик трайбаппарата поднимается и выключается его привод. При подходе переднего конца полосы к барабану моталки снижается скорость вращения валков до минимальной. При этом зев барабана моталки устанавливается напротив траектории движения полосы. Закрепление переднего конца полосы на барабане должно осуществляться за минимальное время с целью предотвращения металла в валка-кристаллизаторах. Скорость вращения барабана моталки подбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимое натяжение полосы с целью избежать ее провисания или обрыва.

Нажимные винты 7 устанавливаются в положение, чтобы обеспечить зазор между валками 1 равным 2 мм. Валки 1 приводятся в движение от электродвигателя 6 от которого вращение передается через муфту 4 на двухступенчатый цилиндрический редуктор 5, далее от редуктора 5 через муфту 4 крутящий момент передается на комбинированную шестеренную клетку 3. Валки соединены с шестеренной клеткой при помощи карданных валов 2, через которые и передается крутящий момент на них (рисунок 5.2).

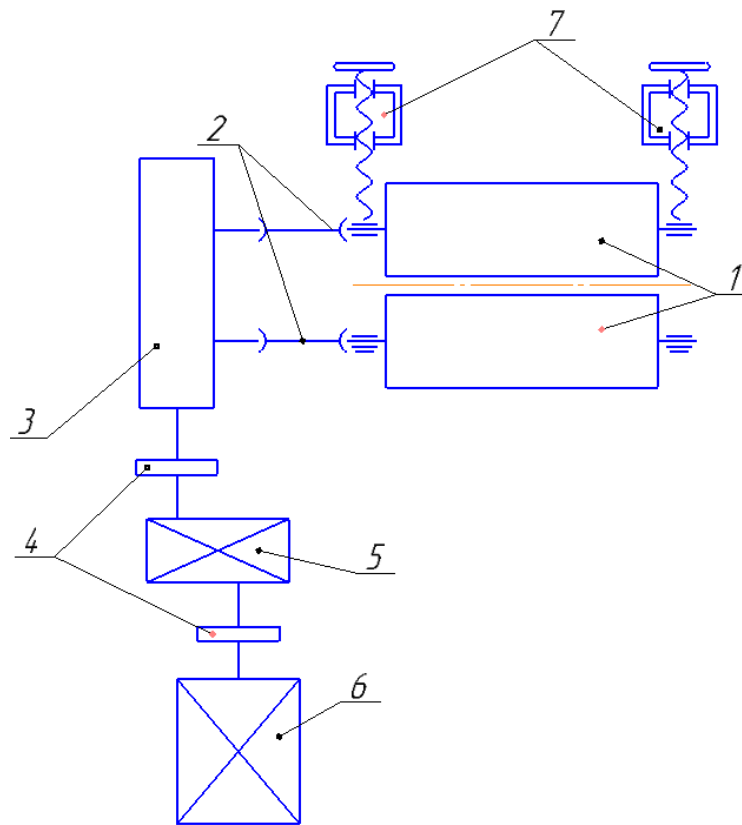


Рисунок 5.2 – Кинематическая схема привода установки непрерывного литья
ЦИНКОВЫХ ПОЛОС

6 РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ УСТАНОВКИ

Произведем расчет на прочность основных узлов установки, которые необходимы для её исправной и правильной работы.

6.1 Расчет нажимного механизма [18]

Схема к нагружению нажимного механизма изображена на рисунке 6.1. Внутри гайки вращается винт нажимной, гайка установлена в швеллере-стойке рамы опытной установки.

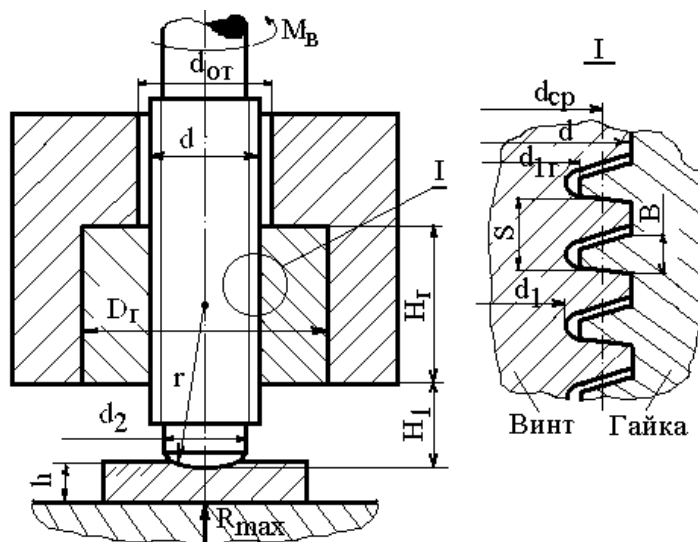


Рисунок 6.1 - Расчетная схема винтового нажимного устройства

6.1.1 Нажимной винт

Материал для нажимного винта выбираем Сталь 50 с пределом прочности 600-650 МПа.

На нажимной винт действует реакция от усилия прокатки на шейку валка $R_{max} = \frac{P}{2}$, и во время установки зазора между валками во время прокатки, - крутящий момент M_B , который приложен к приводному концу винта (рисунок 6.1). Отсюда следует, что нажимной винт подвержен кручению и сжатию.

где $P = 59,87 \text{ кН}$ – усилие прокатки (расчет приведен ниже);

Отсюда найдем $R_{max} = \frac{P}{2} = \frac{59,87}{2} = 29,935 \text{ кН}$.

Чтобы привести винт во вращение, рассчитаем крутящий момент, который необходимо приложить к нему по формуле:

$$M_B = R_{max} \left[f_{\pi} \frac{d_2}{3} + \frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi); \right] \quad (21)$$

где $d = 0,036 \text{ м}$ - наружный диаметр резьбы винта; $d_2 = 0,032 \text{ м}$ - диаметр пяты винта; $d_{cp} = 0,03375$ - средний диаметр резьбы винта (выбираем по ГОСТ 10177-82); $f_{\pi} = 0,2$ (густая смазка) - коэффициент трения в пяте винта; α - угол подъема резьбы; φ - угол трения в резьбе.

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{S}{\pi d} \right); \quad (22)$$

где $S = 0,003 \text{ м}$ - шаг резьбы. Угол подъема резьбы рассчитывают по формуле:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{0,003}{3,14 \cdot 0,036} \right) = 0,02649 \text{ Рад};$$

Угол трения в резьбе можно определить по формуле:

$$\varphi = \operatorname{arctg}(f_B) \quad (23)$$

где $f_B = 0,1$ (жидкая смазка) - трения в резьбе, равный $0,05 \div 0,15$ в зависимости от типа смазки.

$$\varphi = \operatorname{arctg}(0,1) = 0,0997 \text{ Рад};$$

Находим крутящий момент, необходимый для привода во вращение винта по формуле (21):

$$M_B = 29935 \cdot \left[0,2 \cdot \frac{0,032}{3} + \frac{0,03375}{2} \cdot \operatorname{tg}(0,02649 + 0,0997) \right] = 128,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Напряжение кручения в винте рассчитывают по формуле

$$\tau_B = \frac{M_B}{0,2d_1^3}; \quad (24)$$

где $d_1 = 0,0315$ - внутренний диаметр резьбы винта. В случае, если в процессе прокатки настройку зазора между валками не производят, τ_B принимают равным нулю.

$$\tau_B = \frac{128,05}{0,2 \cdot 0,0315^3} = 20,6 \text{ МПа};$$

Напряжение сжатие рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{4R_{max}}{\pi d_1^2}; \quad (25)$$

$$\sigma_{сж} = \frac{4 \cdot 29935}{3,14 \cdot 0,0315^3} = 38,625 \text{ МПа};$$

Суммарные напряжения в винте от совместного действия сжатия и кручения определяют по 4-й теории прочности:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{сж}^2 + 3\tau_B^2}; \quad (26)$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{38,625^2 + 3 \cdot 20,6^2} = 52,58 \text{ МПа};$$

Рассчитываем коэффициент запаса прочности для нажимного винта:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\Sigma}} \quad (27)$$

$$n = \frac{650}{52,58} = 12,362 \text{ МПа}.$$

Исходя из расчетов можно сделать вывод, что условие прочности будет выполняться, так как расчетное значение коэффициента запаса прочности превышает допустимое.

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma} \geq [n]$$

Допустимое значение коэффициента запаса прочности для всех деталей установки, кроме рамы, принимаем равным 5.

$$12,362 \geq 5$$

6.1.2 Нажимная гайка

Материал гайки к нажимному винту выбираем Бр АЖ9-4.

Гайка находится под действием реакции от усилия прокатки R_{max} , поэтому тело гайки рассчитывают на смятие по поверхности ее опоры на стойку рамы, а резьбу гайки рассчитывают на изгиб, смятие и срез.

Напряжение смятия на поверхности соприкосновения гайки с поперечиной станины рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{см.г} = \frac{4 R_{max}}{\pi(D_r^2 - d_{от}^2)}; \quad (28)$$

где $D_r = 0,056$ м - наружный диаметр гайки; $d_{от} = 0,054$ - диаметр отверстия в поперечине станины для прохода нажимного винта (рисунок 6.1).

$$\sigma_{см.г} = \frac{4 \cdot 29935}{3,14 \cdot (0,056^2 - 0,054^2)} = 1,335 \text{ МПа};$$

Напряжения в витках резьбы гайки определяются величиной усилия, действующего на один виток $\frac{R_{max}}{m}$, где m - число витков в гайке, определяемое в зависимости от высоты гайки $H_r = 0,061$ м и шага резьбы $S=0,003$ м:

$$m = \frac{H_r}{S} = \frac{0,061}{0,003} = 20,3.$$

Напряжение смятия резьбы гайки рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{см} = \frac{R_{max}}{m} \cdot \frac{4}{\pi(d^2 - d_{1г}^2)}; \quad (29)$$

где $d = 0,036$ - внутренний диаметр резьбы гайки; $d_{1Г}$ - наружный диаметр резьбы гайки, который можно определить по приближенной формуле (рисунок 6.1):

$$d_{1Г} = d - 1,7S = 0,036 - 1,7 \cdot 0,003 = 0,0309 \text{ м};$$

$$\sigma_{см} = \frac{29935}{20,3} \cdot \frac{4}{3,14 \cdot (0,036^2 - 0,0309^2)} = 5,36 \text{ МПа};$$

Напряжение изгиба в резьбе рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{из} = \frac{R_{max}}{m} \cdot \frac{1,5 \cdot (d - d_{1Г})}{\pi \cdot d \cdot B^2} \quad (30)$$

где B - ширина витка резьбы у основания (рисунок 6.1).

$$\sigma_{из} = \frac{29935}{20,3} \cdot \frac{1,5 \cdot (0,036 - 0,0309)}{3,14 \cdot 0,0306 \cdot 0,0023^2} = 18,89 \text{ МПа};$$

Напряжение среза в резьбе:

$$\tau_{ср} = \frac{R_{max}}{m} \cdot \frac{1}{\pi \cdot d \cdot B}; \quad (31)$$

$$\tau_{ср} = \frac{29935}{20,3} \cdot \frac{1}{3,14 \cdot 0,0306 \cdot 0,0023} = 5,67 \text{ МПа}.$$

Рассчитаем коэффициенты запаса прочности при $\sigma_B = 400$ МПа и $\tau_B = 270$ МПа для Бр АЖ9-4:

- для поверхности соприкосновения гайки с поперечиной станины

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{см.Г}} = \frac{400}{1,335} = 299,625;$$

- для резьбы гайки по напряжениям смятия

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{см}} = \frac{400}{5,36} = 74,77;$$

- для резьбы гайки по напряжениям изгиба

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{из}} = \frac{400}{18,89} = 21,17;$$

- для резьбы гайки по напряжениям среза

$$n = \frac{\tau_B}{\tau_{ср}} = \frac{270}{5,67} = 47,61.$$

Результаты расчета свидетельствуют, что условия прочности нажимной гайки выполняются, так как коэффициенты запаса прочности превышают допустимое значение.

6.2 Расчет элементов станины

Цель данной работы – создать работоспособную установку непрерывного литья полосы с минимально возможным весом и обладающей необходимой прочностью. Следовательно, на этапе разработки, следует проводить расчеты деталей и узлов на прочность.

6.2.1 Расчет швеллера на сопротивление изгибу [19]

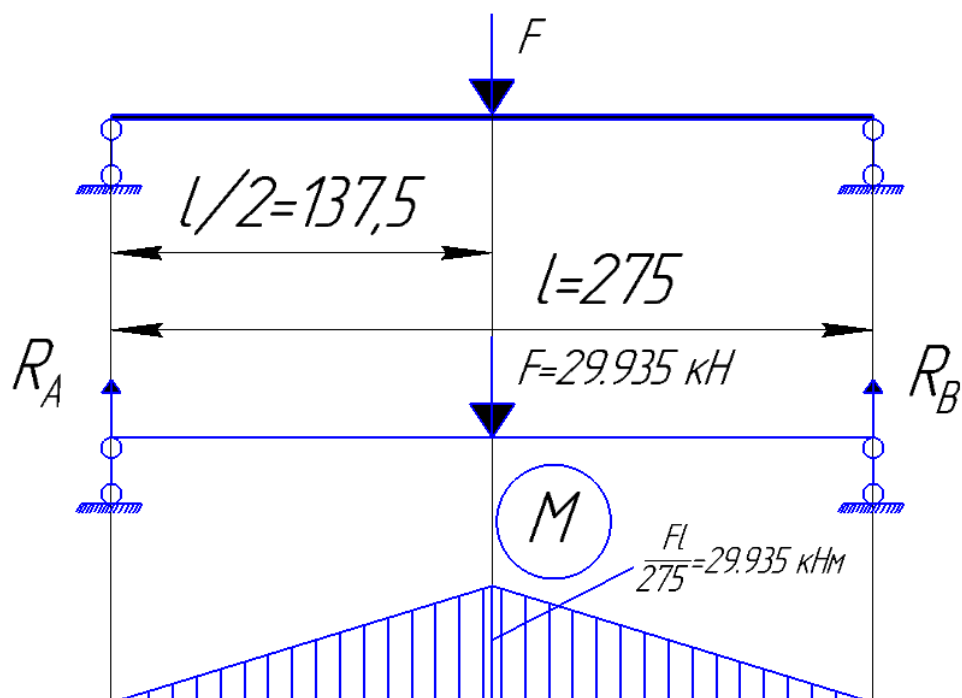


Рисунок 6.2 – Схема к расчету швеллера на прочность

Материал для изготовления швеллера (по ГОСТ 8240-72) Сталь - СтЗсп

$$[\sigma_B] = 370 \div 480 \text{ МПа}; \text{ - предел кратковременной прочности [20]}$$

Реакции в опорах определяются по формуле:

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} = \frac{29935 \text{ Н}}{2} = 14967,5 \text{ Н}; \quad (32)$$

Максимальный изгибающий момент:

$$M_{\text{изг}} = \frac{Fl}{4} = \frac{29935 \text{ Н} \cdot 0,275 \text{ м}}{4} = 2,058 \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad (33)$$

Наибольшее нормальное напряжение в опасном сечении:

W_x для швеллера 12П принимаем равным $50,6 \text{ см}^3 = 50,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$;

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{изг}}}{W_x} = \frac{2,058 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}}{50,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3} = 0,0406 \cdot 10^9 = 40,67 \text{ МПа}; \quad (34)$$

$$[\sigma_B] = 370 > 40,67$$

Геометрические параметры швеллера, при данных условиях нагружения, удовлетворяют условиям прочности.

6.2.2 Расчет шпильки на растяжение [21, Т.2]

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot [\sigma] = F; \quad (35)$$

где d – диаметр резьбы шпильки;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение при растяжении, для стали 3 по II случаю нагрузки $[\sigma] = 80 \text{ МПа}$ [21, Т.1];

F – осевое усилие, приходящееся на одну шпильку,

$$F = \frac{N}{n} = \frac{14967,5 \cdot 2}{4} = 7483,75 \text{ Н}; \quad (36)$$

где N – усилие на шпильку при прокатке, $N = 14967,5$ Н;

n – количество шпилек;

$$d \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi[\sigma]}}; \quad (37)$$

$$d \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 7483,75}{3,14 \cdot 80}} = 10,92 \text{ мм.}$$

Исходя из прочностного расчета, принимаем шпильку диаметром 24 мм, так как она геометрически будет вписываться в общую конструкцию машины.

6.3 Расчет вала

Данный расчет производим в целях предупреждения пластических деформаций в период действия перегрузок. Схема к расчету вала представлена на рисунке 6.3. Методика расчета взята из лекционного материала.

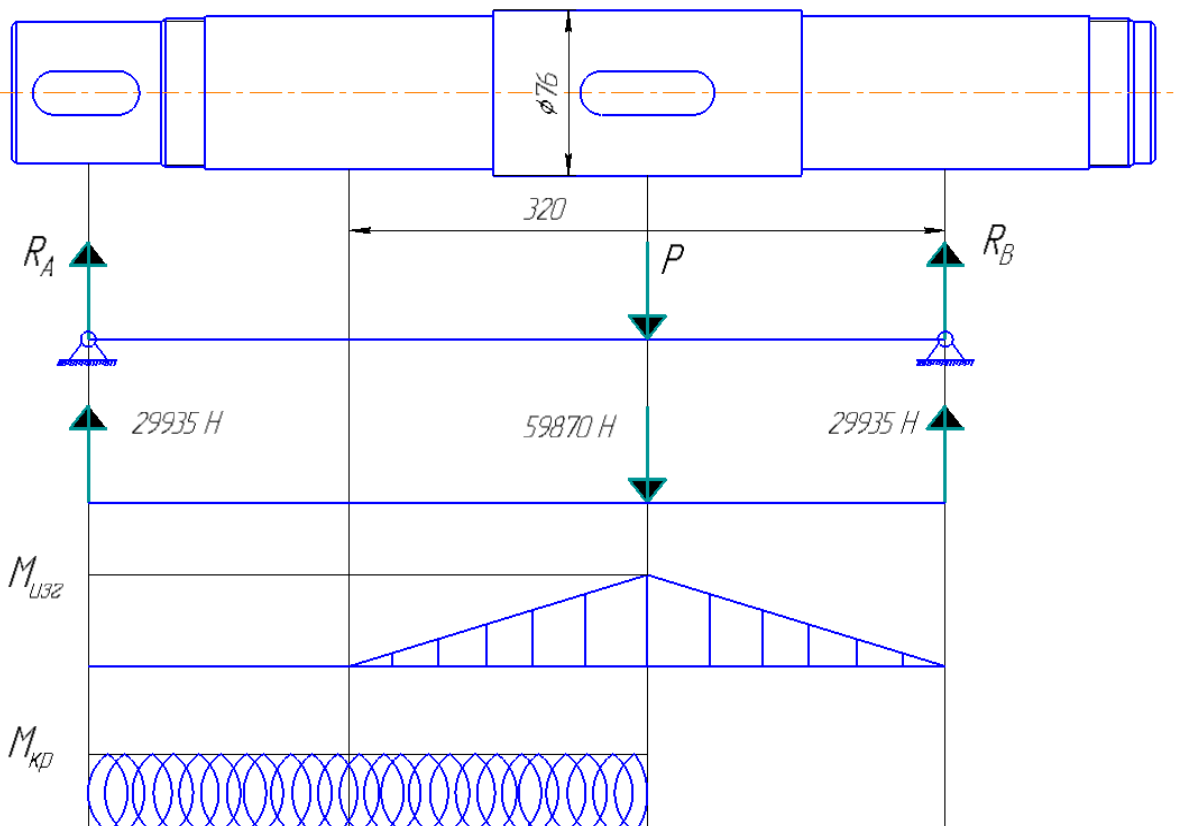


Рисунок 6.3 – Схема к расчету вала на прочность

Реакции в опорах определяются по формуле:

$$R_A = R_B = \frac{P}{2} = \frac{59870 \text{ Н}}{2} = 29935 \text{ Н.}$$

Максимальный изгибающий момент:

$$M_{\text{изг}} = R_A \cdot \frac{320 \text{ мм}}{2} = 29935 \text{ Н} \cdot 160 \text{ мм} = 4789,6 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм.}$$

Крутящий момент на валу:

$$M_{\text{кр}} = 332 \text{ Нм} = 332 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм.}$$

Напряжение изгиба в опасном сечении:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M_{\text{и}}}{W} = \frac{M_{\text{и}}}{0,1d^3} = \frac{4789,6 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм}}{0,1 \cdot (76 \text{ мм})^3} = 109 \text{ МПа.}$$

Напряжение кручения:

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{к}}} = \frac{M_{\text{кр}}}{0,2d^3} = \frac{332 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм}}{0,2 \cdot (76 \text{ мм})^3} = 3,78 \text{ МПа.}$$

где W и $W_{\text{к}}$ – моменты сопротивления сечения вала при изгибе и кручении, м^3 .

$$\sigma_{\text{эк}} = \sqrt{\sigma_{\text{и}}^2 + 3\tau_{\text{кр}}^2} = \sqrt{109^2 + 3 \cdot 3,78^2} = 109,2 \text{ МПа.} \quad (38)$$

Необходимо выполнение следующего условия:

$$\frac{\sigma_{\text{в}}}{[n]} > \sigma_{\text{эк}}; \quad (39)$$

$[\sigma]_{\text{в}}$ – предел кратковременной прочности, для стали $40 \sigma_{\text{в}} = 570 \text{ МПа}$, [20];

$[n]$ – запас прочности, для ролика $[n] = 5$.

$$[\sigma] = 114 > 109,2$$

Геометрические параметры ролика, при данных условиях нагружения, удовлетворяют условиям прочности.

6.4 Расчет подшипники качения

В данной конструкции установлены роликоподшипники радиальные сферические двухрядные тип 3514 (ГОСТ 5721-57) [22].

Номинальная долговечность в часах:

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^p, \quad (40)$$

Где C — динамическая грузоподъемность, $C = 6810 \text{ кг} = 66700 \text{ Н}$ [46];

p — показатель степени: для роликоподшипников $p = 10/3$;

n — частота вращения вала, $n = 24 \text{ мин}^{-1}$.

P — эквивалентная нагрузка для двухрядных роликоподшипников радиальных сферических:

$$P = F_r V K_G K_T. \quad (41)$$

где F_r — нагрузка на подшипник, $F_r = R_A = 29935 \text{ Н}$;

K_G — коэффициент безопасности, $K_G = 1,2$ [46];

K_T — температурный коэффициент, $K_T = 1,05$ [46];

V — коэффициент вращения; при вращении наружного кольца $V = 1$.

$$P = 29935 \text{ Н} \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1,05 = 37718 \text{ Н};$$

$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot 24 \text{ мин}^{-1}} \left(\frac{66700}{37718} \right)^{\frac{10}{3}} = 820 \text{ ч.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе были изучены технологии получения полос непрерывной разливкой, этапы развития непрерывной разливки полос, состояние технологии и технико – экономическая эффективность непрерывной разливки полос, современный уровень научных исследований по непрерывной разливке цинковых полос, приведены конструкции валков – кристаллизатора, а также описана целесообразность использования непрерывной разливки полос в условиях ООО НПО «РосАнтикор» г. Челябинска. Также был произведен выбор параметров опытной установки непрерывной разливки полос и расчет её энергосиловых параметров. Представлены основные конструкторские решения по разработке рабочей клетки для непрерывной разливки полос. Описана технология получения полос непрерывной разливкой на опытной установке и произведен расчет на прочность основных узлов установки.

Задачи выпускной квалификационной работы решены. Поставленные цели достигнуты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Германн, Э. Непрерывное литье / Э. Германн; Справ, изд.: Пер. с нем.; под ред. В.И. Добаткина, В.С. Рутеса и Э.Р. Шора. - М.: Metallurgizdat, 1961. - 814 с.
2. Степанов, А.Н. Производство листа из расплава / А.Н. Степанов, Ю.В. Зильберг, А.А. Неуструев. - М.: Metallurgiya, 1978. - 160 с.
3. Бесслитковая прокатка алюминиевой ленты / Матер. Всес. школы-совещания. - М.: Цветметинформация, 1969. — 88 с.
4. Захаревич, Н.И. Непрерывное литье металлов в движущиеся формы / Н.И. Захаревич, Л.Я. Майзлин, П.И. Софийский; под ред. В.И. Добаткина. - М.: ВИЛС, 1966.-44 с.
5. Бровман, М.Я. Установки непрерывной разливки металлов с подвижными кристаллизаторами / М.Я. Бровман / Электromеталлургия. – 204. – №12. – с 25-35.
6. Либерман, А.Л. Непрерывная разливка стали — современное состояние и перспективы развития / А.Л. Либерман, В.Я. Генкин / Электromеталлургия. - 2002. - № 1. - С. 23 - 32.
7. Ганьжин, В. Технология XXI века. Перспективы России / В. Ганьжин, Ю. Киселев / Национальная металлургия. - 2003. Янв.-февр. С. 77-86.
8. Антипин, В.Г. Прогресс в производстве тонких стальных полос / В.Г. Антипин / Бюл. «Черная металлургия». - М.: ОАО «Черметинформация». - 2002. - №8. - С. 3 – 9.
9. Ревякин, А.В. Промышленное использование технологии непрерывной отливки тонкого листа / А.В. Ревякин / Сталь. - 2001. — №5. — С. 27-30.
10. Матвеев, Б.Н. Непрерывная отливка тонких полос на микрoзаводах с применением валковых кристаллизаторов / Б.Н. Матвеев / Производство проката. - 2004. - № 3. - С. 44 - 47; продолжение: 2004. - №4. С. 33-41.

11. Высокотехнологичное оборудование для металлургической промышленности : сб. тр. междунар. науч.-практ. конф., поев. 100-летию со дня рождения акад. А.И. Целикова. - М.: ВНИИМЕТМАШ им. акад. А.И. Целикова, 2004.-360 с.
12. Академик Александр Иванович Целиков / сост.: В.Г. Дрозд, Б.А. Сивак, Н.А. Целиков. Отв. ред. Н.В. Пасечник. - М.: Наука, 2004. 613 с.
13. Запускалов, Н. Новое поколение металлургических заводов / Н. Запускалов / Металлоснабжение и сбыт. - 2003. — №6. - С. 116-121.
14. Линденберг, Х.-У. Проект Eurostrip - современный уровень техники литья полосы / Х.-У. Линденберг, Ж. Анрион, К. Шваха, Дж. Веспасиани / Черные металлы. - 2002. Май. - С. 70 - 77.
15. Николаев, В.П. Исследование процесса бесслитковой прокатки стальной полосы с целью определения эффективных технологических и конструктивных параметров: дисс. канд. Техн. Наук / В.П. Николаев. - Москва 2008. – 193с.
16. Бровман, М.Я., Процесс формирования полосы и основу расчета технологических режимов валковых ЛПА / М.Я. Бровман, В. Ал. Николаев / В кн. «Медь. Латунь. Бронза». Ус. Пос. для вузов. Под общей ред. Ю.Н. Райков – М.: ОАО «Институт Цветметобработка», 2006. С. 319-331.
17. Бровман, М.Я., К вопросу о кристаллизации стальных валков / М.Я. Бровман, А.В. Царев / Известия РАН. Металлы. – 1997.- №4. – С. 40-41.
18. Шилов, В.А. Расчеты рабочих клетей прокатных станов / В.А. Шилов, Ю.В. Инатович / УГТУ-УПИ, Екатеринбург – 2000. – С.21-26.
19. Ицкович, Г.М. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов / Г.М. Ицкович, Л.С. Минин, А.И. Винокуров / Издание третье, переработанное и дополненное, «Высшая школа» 1999. – С. 177-178.
20. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский и др.; Под общей ред. А.С. Зубченко – М.: Машиностроение, 2001. 672 с.

21. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х тт. – М.: Машиностроение, 1999.
22. Бейзельман Р.Д. Подшипники качения: Справочник / Р.Д. Бейзельман, Б.В. Цыпкин, Л.Я. Перель. - М. Машиностроение 1975г. 574 с.