

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургия цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Н.В. Белоусова

подпись инициалы, фамилия

« ____ » _____ 2020г.

Исследование алюминиевой заготовки и анализ причин образования дефектов
тема

22.04.02 Металлургия

код и наименование направления

22.04.02.02 Металлургия цветных металлов

код и наименование магистерской программы

Научный

руководитель _____ канд. техн. наук, доцент
подпись, дата должность, ученая степень

Е. М. Лесив
инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

А.Ю. Порайко
инициалы, фамилия

Рецензент АО Русал Саянал, директор по производству

В.В. Павлов
инициалы, фамилия

Экономическая

часть _____ канд. эконом. наук, доцент
подпись, дата должность, ученая степень
инициалы, фамилия

Т.В.Твердохлебова
инициалы, фамилия

Красноярск 2020

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа на тему «Исследование алюминиевой заготовки и анализ причин образования дефектов» содержит 75 страниц текстового документа, 51 использованный источник литературы, 36 рисунков и 14 таблиц.

Объект исследований – способ совмещенного литья и прокатки металла в условиях фольгопрокатного производства ОАО «РУСАЛ-САЯНАЛ»

Цель работы: анализ причин образования дефектов и разработка рекомендаций по повышению качества алюминиевой заготовки, полученной методом бесслитковой прокатки.

В результате проведения научно-исследовательской работы установлено влияние различных факторов на качество фольговой заготовки, полученной способом бесслитковой прокатки. Определены рациональные технологические режимы бесслитковой прокатки, обеспечивающие стабильность процесса и качество продукции. Предложена ультразвуковая обработка расплава, как один из эффективных способов повышения качества алюминиевой заготовки под последующую холодную прокатку фольги.

БЕССЛИТКОВАЯ ПРОКАТКА, ПРОИЗВОДСТВО АЛЮМИНИЕВОЙ ФОЛЬГИ, АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ 8011, ГЛУБИНА ЛУНКИ, УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА РАСПЛАВА.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Обзор научно-технической литературы по тематике исследования	6
1.1 Мировые тенденции производства фольги из алюминия и его сплавов	6
1.2 Производство фольговой заготовки на агрегатах бесслитковой прокатки ..	8
1.3 Факторы, влияющие на стабильность процесса бесслитковой прокатки и качество получаемой алюминиевой заготовки.....	15
1.4 Требования к алюминиевые сплавам для получения фольговой продукции.....	18
1.5 Рафинирование расплава при бесслитковой прокатке	21
1.5 Выводы по главе и постановка цели и задач исследования.....	27
2 Методы исследования, приборы и оборудование, используемые в работе Error! Bookmark not defined.	
2.1 Технология бесслитковой прокатки на ОАО «РУСАЛ САЯНАЛ»..... Error! Bookmark not defined.	
2.2 Исследования качества и свойств алюминиевой ленты.... Error! Bookmark not defined.	
3 Численное моделирование бесслитковой прокатки	Error! Bookmark not defined.
3.1 Постановка задачи моделирования	Error! Bookmark not defined.
3.2 Анализ результатов моделирования.....	Error! Bookmark not defined.
3.3 Выводы по разделу 3	Error! Bookmark not defined.
4. Анализ причин образования дефектов при совмещенном литье и прокатке Error! Bookmark not defined.	

4.1 Поверхностные дефекты фольговой заготовки	Error! Bookmark not defined.
4.2 Горячие трещины в фольговой заготовке	Error! Bookmark not defined.
4.3 Холодные трещины в фольговой заготовке...	Error! Bookmark not defined.
4.4 Выводы по главе 4.....	Error! Bookmark not defined.
5 Рекомендации по повышению эффективности рафинирования расплава	Error! Bookmark not defined.
5.1 Дегазация расплава и удаление включений с помощью установки ультразвуковой обработки.....	Error! Bookmark not defined.
5.2 Выводы по главе 5.....	Error! Bookmark not defined.
6 Обоснования эффективности предложенных технико-технологических решений по рафинированию расплава.....	Error! Bookmark not defined.
Заключение	Error! Bookmark not defined.
Список использованных источников	Error! Bookmark not defined.

Введение

В последние годы значительно вырос мировой спрос на алюминиевую фольгу различного назначения. С точки зрения обработки металлов давлением она считается плоским алюминиевым прокатом с толщиной от 4,5 до 150 мкм.

В качестве исходного сырья применяют первичный алюминий и сплавы 1XXX (1100, 1145, 1050, 1235), 3XXX (3003 и 3102) и 8XXX (8006, 8011, 8011А, 8111, 8079) серий.

В алюминиевой промышленности используют две технологии производства фольги:

- бесслитковая прокатка ленты (БПЛ);
- горячая прокатка алюминиевой фольги из слябов.

Наиболее экономически выгодным считается способ совмещенного литья алюминиевых лент на агрегатах БПЛ.

В настоящее время лидером российской фольгопрокатной отрасли по объему производства и разнообразию ассортимента продукции является ОАО «РУСАЛ-САЯНАЛ» мощностью 41 000 тонн фольги. Однако, не смотря на современное производство на предприятии существуют задачи по повышению качества продукции, на решение которых направлена настоящая работа.

1 Обзор научно-технической литературы по тематике исследования

1.1 Мировые тенденции производства фольги из алюминия и его сплавов

Последние пять лет потребительский спрос на алюминиевую продукцию связан с мировыми процессами глобальной урбанизации и индустриализации (рис. 1.1). В общей структуре потребления фольга занимает 8% (рис. 1.2), при этом каждый год прирост потребления составляет более 4,5 % [1]. ОК РУСАЛ и в том числе АО «РУСАЛ-САЯНАЛ» является одним из мировых лидеров производства фольговой продукции с годовым производством более 80 тыс. ТОНН.

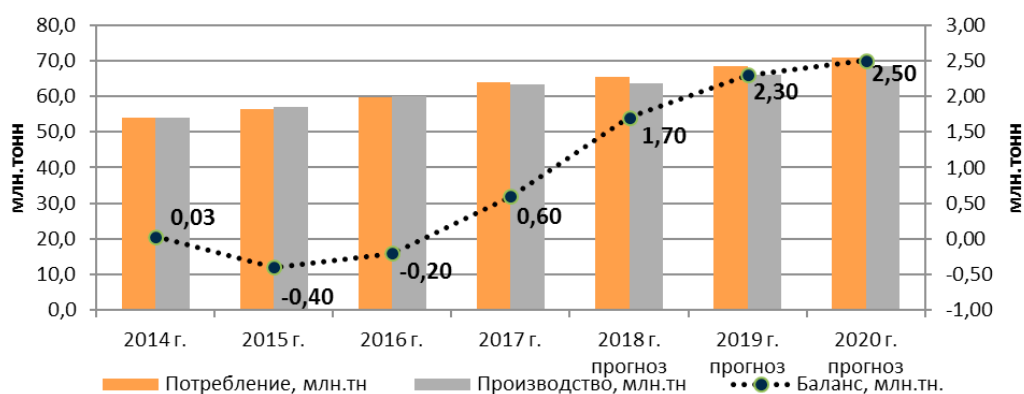


Рисунок 1.1 – Мировой баланс производства и потребления алюминия, 2014–2020 гг. [1]



Рисунок 1.2 – Структура потребления алюминия за 2017 год [1]

Фольгой называют тонкую холоднокатаную ленту, в частности, из алюминия. В соответствии с национальными стандартами верхний предел толщины фольги, мкм, во Франции, как и в России, 200, в США и Великобритании 150, в Германии 60, более толстую фольгу называют «тонкой лентой». Минимальная толщина фольги обычно составляет 6 мкм, в незначительных количествах для электрических конденсаторов выпускают фольгу толщиной 4,5—5 мкм. Номенклатура и назначение алюминиевой фольги приведены в таблице 1.1 [2].

Таблица 1.1 – Номенклатура и назначение алюминиевой фольги [2]

Al-фольга	Толщина фольги, мкм	Назначение
1	2	3
Гибкая упаковка		
Гладкая в рулончиках	12-15	Фольга для домашнего применения
С печатью и лаком	13-15	Фольга для расфасовки отдельных порций продуктов
Окрашенная и/или лакированная с (без) печатью и тиснением	12-50	Фольга для расфасовки кондитерских изделий и шоколада
Окрашенная, лакированная с термосвариваемым слоем и печатью	20-30	Фольга для фармацевтической продукции в виде таблеток и т. п.
Лакированная с термосвариваемым слоем, с печатью и/или тиснением	30-50	Крышки для стаканчиков и ванночек для кефира, йогурта, масла, плавленого сыра и т. п.
Окрашенная и лакированная	50	Колпачки для бутылок молока и молочных продуктов
Кашированная с одним слоем полимерной пленки, с (без) печатью	20-30	Упаковка фармацевтических и косметических изделий
Кашированная с одним слоем полимерной пленки с печатью и лаком	20-50	Пластмассовые стаканчики и ванночки для молочной продукции
Кашированная с одним слоем бумаги, с (без) печатью и лаком	7-14	Упаковка сигарет, чая, мороженого, масла, маргарина, мыла, печенья, кондитерских изделий, мешков и этикеток
Кашированная несколькими слоями полимерных пленок и/или бумаги с печатью	8-20	Упаковка кофе и чая, супов, сублимированных продуктов, печенья, вафель, диетических продуктов, детского питания, косметики, туалетных салфеток, замороженных продуктов и

		готовых блюд, колбасных изделий (под вакуумом), фруктовых соков
--	--	---

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
Полужесткая упаковка		
Гладкая с (без) лаком	60-100	Тара, крышки упаковок разового потребления для пищевых продуктов и готовых блюд
С печатью и лаком	150-240	Крышки для бутылок, пищевых и фармацевтических продуктов
Кашированная, с одним слоем полимерной пленки, с (без) печатью	50-150	Тара, крышки упаковок готовых блюд, варенья и др.
Кашированная с несколькими слоями картона и полимерной пленки, с печатью	8-10	Фольга для асептической расфасовки жидкостей (молочные продукты, фруктовые соки и т. п.)
Техническая фольга		
Кашированная с несколькими слоями полимерной пленки	50-300	Фольга для экранирования кабелей телесвязи и силовых кабелей
Конденсаторная косинусная	5-7	Косинусные конденсаторы
Конденсаторная анодная из алюминия чистотой 99,99%	85-100	Аноды электролитических конденсаторов с туннельным эффектом и кубической текстурой
Конденсаторная катодная	20-50	Катоды электролитических конденсаторов
Из сплава Al-1% Fe	120	Для теплообменников бытовых кондиционеров

Ширина выпускаемой фольги в последние годы достигла 1,5—2 м, но на рынок фольга обычно поставляется шириной до 400—500 мм в соответствии с требованиями потребителя.

1.2 Производство фольговой заготовки на агрегатах бесслитковой прокатки

Мировая практика показывает, что для производства фольги из алюминия технической чистоты и низколегированных алюминиевых сплавов экономически и технически целесообразнее использовать заготовку,

полученную способом беслитковой прокатки (БПЛ) [2, 3]. Это обеспечивает возможность замкнутого технологического цикла в пределах одного предприятия, специализацию агрегатов БПЛ, исключает необходимость транспортировки заготовки на значительные расстояния, уменьшая тем самым вероятность ее повреждения (коррозия, механические дефекты и т. д.). Кроме того, существенно снижаются расход металла и энергетические затраты вследствие исключения обрезки, фрезерования, нагрева слитков и горячей прокатки [2].

Родоначальником применения подвижных кристаллизаторов для производства непрерывнолитых металлических заготовок считается английский изобретатель Генри Бессемер (Henry Bessemer), который в 1848 году в качестве способа получения фольги, предложил заливать расплав в валки прокатного стана. В 1865 году получил патент на способ, названный беслитковой прокаткой (рис. 1.3) [4].

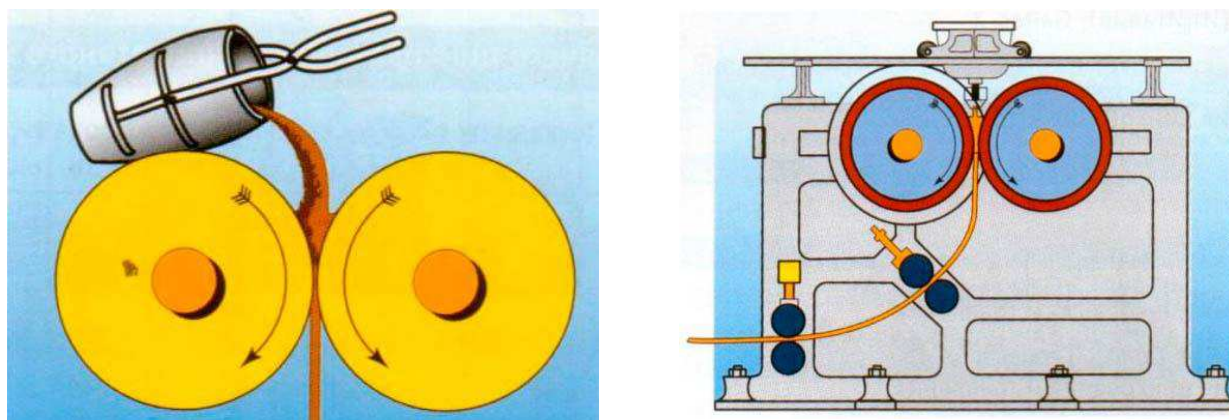


Рисунок 1.3 – Эскиз, сделанный Г. Бессемером (а), и установка (б), запатентованная им в 1865 году [4]

Способ так и не был осуществлен из-за различных конструктивных и технологических недостатков, приводящих к низкому качеству получаемой после прокатки заготовки.

Позже изобретатель Clarence Hazelett для повышения качества поверхности заготовки предложил заливать металл только на один охлаждаемый волок с последующей прокаткой (рис. 1.4). Разработанный стан позволял получать латунную и медную заготовку с шириной 75 мм и толщиной до 0,4 мм.

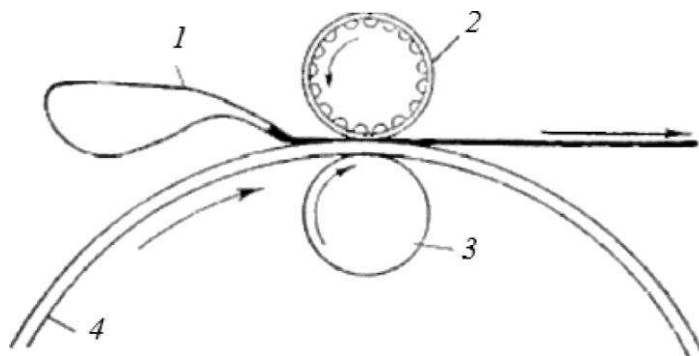


Рисунок 1.4 – Схема БПЛ по способу Hazelett: 1 – устройство для подачи расплава; 2 - приводной валок; 3 - опорный валок; 4 - кольцо

В промышленное производство агрегат запущен в 1929 году. При этом процесс литья и прокатки совмещен со штамповкой для получения свинцовых аккумуляторных решеток.

Одновременно с западными исследователями в СССР Е.Г. Николаенко и А.В. Улитовский разработали способ жидкой прокатки (рис. 1.5). Принцип работы устройства заключается в подаче расплава между валками с внутренним водяным охлаждением, расположенными по углом. Способ применялся для получения листовой заготовки из никельлюминиевой магнитной стали с толщиной 0,3...3,0 мм под последующую горячую штамповку.

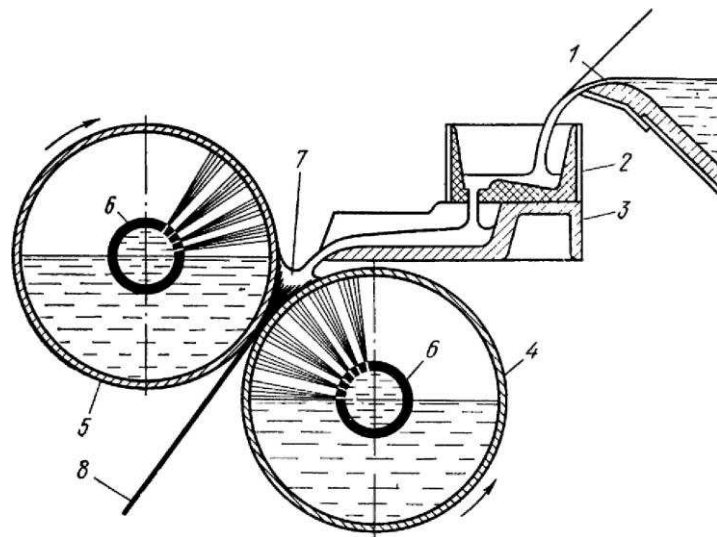


Рисунок 1.5 – Жидкая прокатка расплава по способу Николаенко-Улитовского:
 1 - ковш; 2 - чаша; 3 - питатель; 4, 5 приводной и не приводной валок; 6 – охлаждение;
 7 – очаг кристаллизации; 8 – лента

В общем случае устройства БПЛ классифицируют по расположению валков и способу подачи расплава (рис. 1.6) [5].

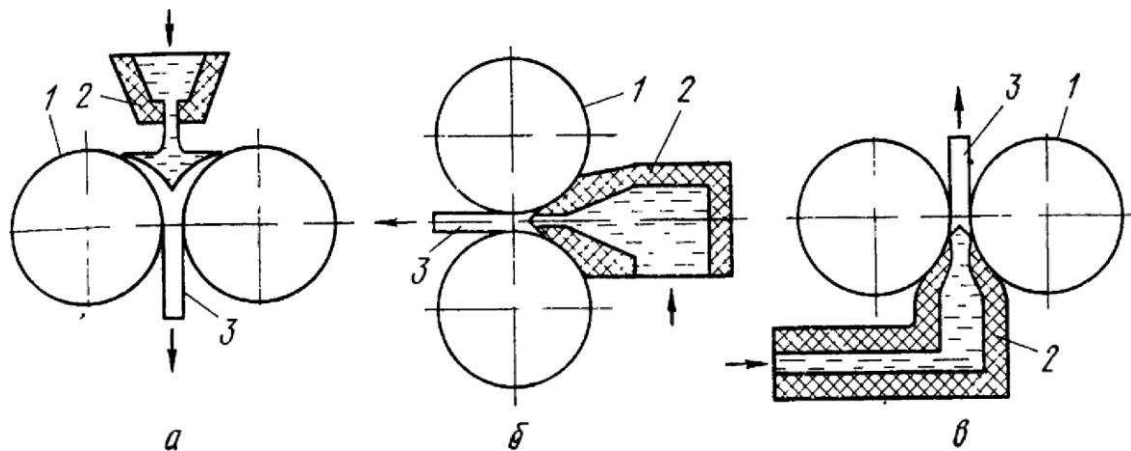


Рисунок 1.6 – Схемы БПЛ: а – подача сверху; б - подача сбоку; в – подача снизу; 1 - валки; 2 – устройство подачи расплава; 3 – лента [5]

В производстве заготовок из цветных металлов наибольшее применение нашла схема с подачей сбоку (рис. 1.6 б). На предприятиях по производству алюминия агрегаты БПЛ оказались исключительно эффективны по причине

доступности первичного алюминия, который поступает из цеха электролиза для последующего получения заготовки способом совмещенного литья и прокатки.

Впервые алюминиевую фольгу методом многослойной прокатки толщиной 50 мкм получил в 1905 г. Гаучи. Через пять лет в Швейцарии удалось уменьшить толщину прокатываемой фольги в 2 раза, а с 1928 года началось производство алюминиевой фольги в промышленных масштабах. Так, германская компания Гревенбройха выпускала до 1,5 тыс. т. фольги в год.

Способ совмещенного литья и прокатки окончательно получил признание после того как к 1960 году по результатам исследований [6] установлено, что для получения деформированной структуры и заданного уровня механических свойств алюминиевой ленты необходимо обжатие не менее 50% что потребовало увеличение давления на валках в 10 раз.

Начиная с 1948 года, компания Hunter Engineering стала выпускать агрегаты БПЛ с подачей расплава снизу. В Советском Союзе аналогичный агрегат БПЛ был разработан в 1962 году ВНИИМетМаш и в 1967 г. внедрен на Канакерском алюминиевом заводе и на Михайловском заводе по обработке цветных металлов (рис. 1.7).

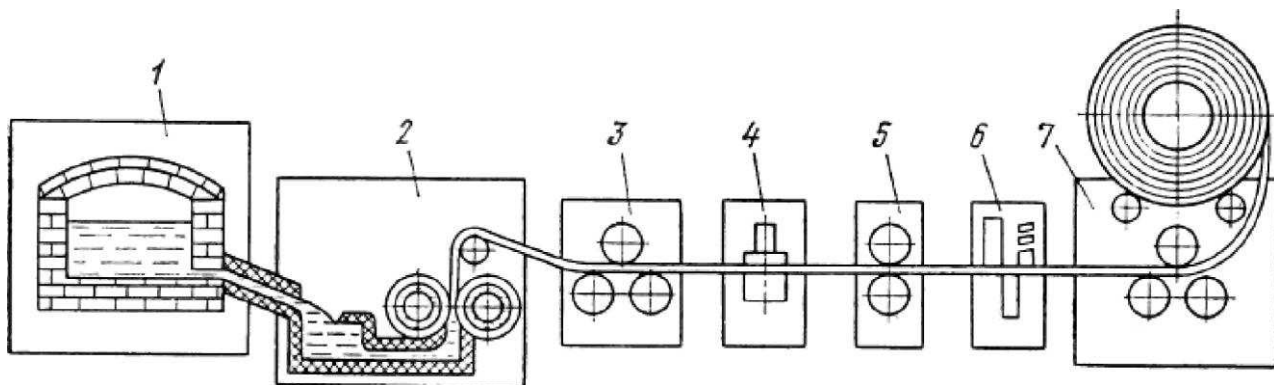


Рисунок 1.7 – Схема агрегата БПЛ ВНИИМетМаш: 1 – печь-миксер; 2 – установка литья и прокатки; 3 - правильно-натяжная машина; 4 - центрирующие ролики; 5 – обрезка кромок; 6 - летучие ножницы; 7 - моталка

Мировыми лидерами в производстве агрегатов БПЛ считаются американская компания «Hunter Engineering» и французская «Pechiney» [2, 7-11].

В таблице 1.2 представлены сравнительные характеристики действующих агрегатов БПЛ [11].

В Саяногорске с 1993 года запущена линия бесслитковой прокатки «SuperCaster» (рис. 1.8) с боковой подачей расплава, на которой производят ленту из алюминиевых сплавов 1XXX и 8XXX серии для последующей прокатки фольги. Жидкий алюминий, проходя через распределительную керамическую насадку, равномерным потоком попадает в створ между водоохлаждаемыми валками - кристаллизаторами, где происходят три процесса: охлаждение металла до температуры кристаллизации, кристаллизация и деформация. Температура ленты на выходе из валков-кристаллизаторов составляет $270\div 350^{\circ}\text{C}$ в зависимости от толщины ленты и сплава. Литая рулонная заготовка имеет следующие параметры: ширина – $1000\div 1745$ мм; толщина – макс. $5\div 10$ мм.

Таблица 1.2 – Основные характеристики литейно-прокатных агрегатов установленные на отечественных и зарубежных заводах

Литейно-прокатный агрегат	Подвод металла	Диаметр валков, мм	Длина бочки валка, мм	Толщина /ширина полосы, мм	Скорость литья, м/мин	Марка сплава
Фольгопрокатный завод, г. С-Петербург	сбоку	490-510	1200 - 1900	8-12/1030	1,1	1050 1200 8011
АО«Уральская фольга», г. Михайловск	снизу	720-750	1200-1750	3-8/1000-1600	2,3	3003 8011
АО«РУСАЛ САЯНАЛ», г. Саяногорск, FATA Hunter «SuperCaster»	сбоку	620-1010	2000	6-8/1600	до 2,5	1050 1200 8011
«Pechiney», Франция – FATA	сбоку горизонт.	1000	2000	4/1650	13,0	1200 3003

Hunter «Speed Caster»						5050
MDTRC (Англия) «Kvaemel Davu»	Верх	медные валки	-	1/-	до 60	Кроме заэвтектических
Проект г. Осака (Япония) HPTRC+CS	Верх	медные валки	-	0,5/-	до 150	Все сплавы

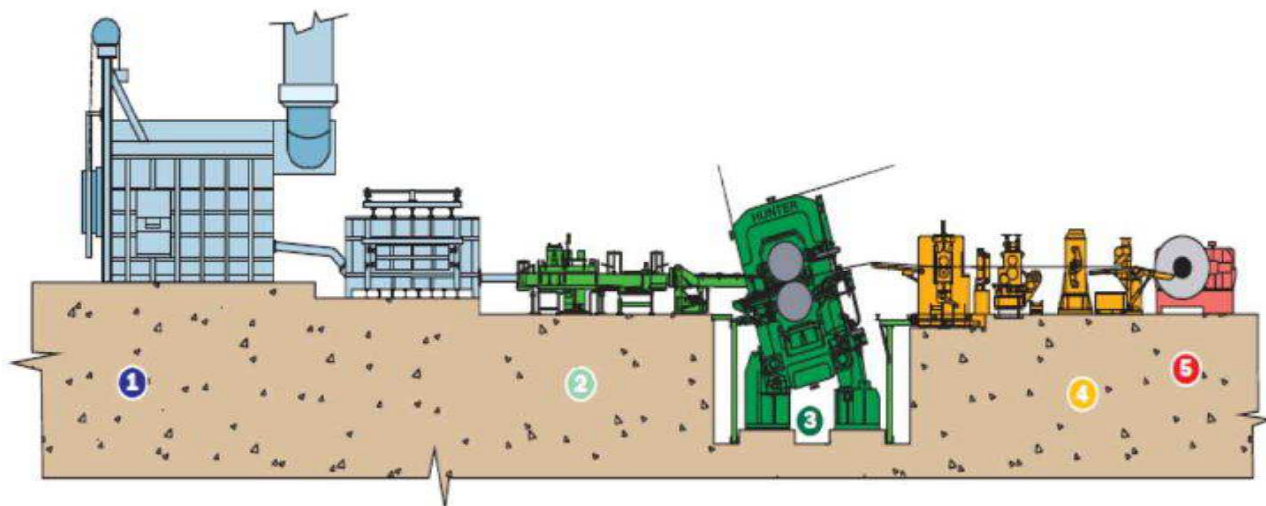


Рисунок 1.8 – Линия бесслитковой прокатки FATA-Hunter «SuperCaster»

На линии SpeedCaster [12], за счет уменьшения толщины ленты до 1,1 мм, удалось повысить скорость литья до 13 м/мин.

Хорошие результаты по увеличению скорости прокатки дает замена стального бандажа валков-кристаллизаторов на медный [10, 13, 14], что позволяет лучше контролировать кристаллизацию в активной зоне и тем самым повысить качество алюминиевой заготовки.

Еще одним способом повышения скорости литья является применение выдавливания расплава в зазор валков-кристаллизаторов [10]. На агрегатах «Kvaemel Davu» (Англия), в лабораторных условиях, удалось увеличить скорость литья до 70 м/мин из сплавов 1XXX, 3XXX и 5XXX серии. Эта же компания разработала литейно-прокатный агрегат MDTRC [11] в котором установлены валки-кристаллизаторы разного размера с медными бандажами и регулируемым обжатием, что позволило оптимизировать тепловые условия в

очаге кристаллизации-деформации, повысить качество получаемой полосы и увеличить скорость литья.

Аналогичный подход для повышения скорости литья предложен японскими учеными под руководством Т. Хага, разработавшие ЛПА HPTRC+CS [13, 14]. При этом перед подачей жидкого металла в валки-кристаллизаторы расплав под давлением до 150 атм проходит через охлаждаемое переливное устройство. Создание условий твердожидкого состояния позволило увеличить скорость литья до 150 м/мин.

Можно выделить следующие меры к повышению скорости литья при совмещенном литье и прокатке:

- увеличение диаметра валков-кристаллизаторов;
- применение медных бандажей для увеличения теплоотвода;
- применение «холодильников»;
- является изменение конструкции установки;
- внедрение комплексной автоматизации процесса с целью динамического управления производительность установки и свойствами получаемой алюминиевой заготовки.

1.3 Факторы, влияющие на стабильность процесса бесслитковой прокатки и качество получаемой алюминиевой заготовки

Факторы, определяющими стабильность совмещенного литья и прокатки при заданных конструктивных параметрах ЛПА и сплава можно разделить на две категории:

литейные:

- температура жидкого металла в насадке;
- скорость литья;

деформационные:

- степень деформации при прокатке;

- давление металла на валки.

Ключевым литейным параметром бесслитковой прокатки считается фронт кристаллизации (лунка), положение которого при квазистационарных условиях литья и прокатки не изменяются относительно оси валков. Глубиной лунки жидкого металла называется расстояние от поверхности носка распределительной литниковой насадки, находящейся в контакте с валком расплава, до зоны смыкания затвердевающих на противоположных стенках кристаллизатора поверхностных слоев.

Глубина лунки должна быть в узком диапазоне при конструктивно заданной длине активной зоны A (рис.1.9), температуре литья и поверхности валка [3]. На рисунке 1.9 показана схема активной зоны бесслитковой прокатки.

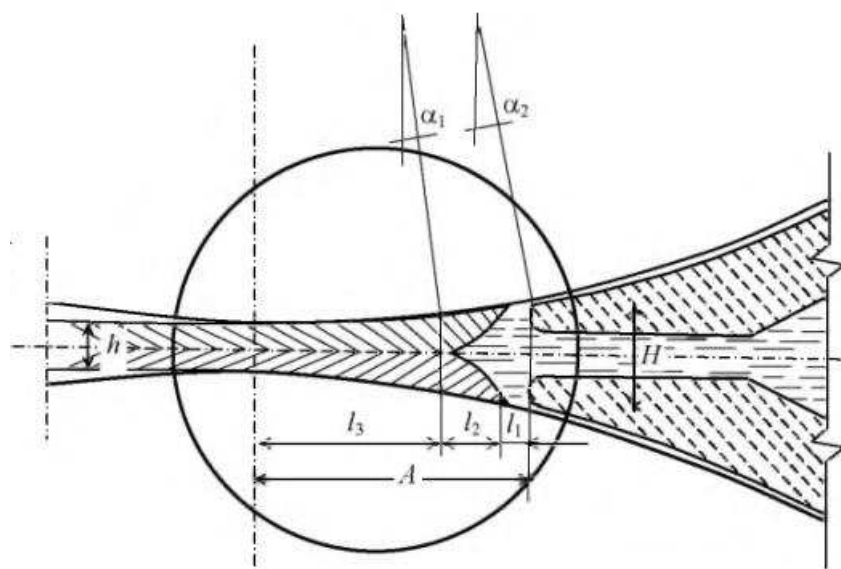


Рисунок 1.9 – Схема активной зоны

Длина активной зоны - A является суммой составляющих длины зоны охлаждения - l_1 , длины зоны кристаллизации - l_2 , длины зоны прокатки - l_3 . При вращении валков-кристаллизаторов расплав толщиной H захватывается их поверхностью с углом захвата α и прокатывается в полосу толщиной h .

Расплавы подаются через насадку в зазор вращающихся валков-кристаллизаторов и, растекаясь вдоль бочки валков, заполняют часть пространства в виде лунки клиновидной формы. В результате контактного взаимодействия с поверхностью охлажденных валков-кристаллизаторов

расплав в лунке интенсивно охлаждается и кристаллизуется. На поверхности валков-кристаллизаторов намораживаются слои металла, которые постепенно увеличиваются по толщине при движении вдоль контакта с ними, где деформируются по заданным величинам ширины и толщины полосы, которые определяются литниковой системой и зазором между валками [5,16,17]. На длительность контакта жидкого металла с валками влияет скорости вращения валков-кристаллизаторов.

В зазоре валков-кристаллизаторов постоянно находится определенное количество расплава с изменяющимся содержанием твердой фазы. В верхней части лунки находится минимальное количество закристаллизованного слоя, а в осевой плоскости - минимальное содержание жидкой фазы. Глубина лунки, имеющая клиновидную форму, определяется в основном технологическими параметрами литья, силами поверхностного натяжения, расходом жидкого металла и геометрическими размерами валков-кристаллизаторов.

Сравнение параметров бесслитковой прокатки для агрегатов с горизонтальным подводом расплава к валкам обеспечивающие выпуск качественной алюминиевой заготовки приведено в таблице 1.3 [11].

Таблица 1.3 – Технологические параметры агрегата бесслитковой прокатки

Параметры процесса БП	До 1971 г. А5	После 1971г. сплав 1050	2002 г. сплав 8011
1 Толщина получаемой ленты, мм	8,3	10	7,2
2 Длина активной зоны, мм	57	40	55
3 Угол захвата	11	9	8
4 Угол наклона дендритов	18	26	34
5 Длина зоны перегретого металла, мм	5	3	3
6 Длина зоны кристаллизации, мм	10	6	5
7 Длина зоны деформации, мм	42	31	36
8 Скорость выхода ленты из вала, м/мин	0,85	0,6	1,1
9 Минутная производительность, кг	20	16	29
10 Температура валков при выходе полосы, °С	85	80	65
11 Давление металла на валки, МПа	2000	1400	1350
12 Относительное обжатие, %	53	28	62
13 Толщина жидкой фазы перед насадкой, мм	21	14	28
14 Величина зерна структуры, мкм		40	25
15 Подача технологической смазки, л/час	16	4	10

1.4 Требования к алюминиевым сплавам для получения фольговой продукции

Возрастающие требования к механическим свойствам фольговой продукции ограничивает перечень алюминиевых сплавов для их производства.

Одной из основных задач для более широкого распространения этого способа специального литья является расширение номенклатуры сплавов.

В табл. 1.4, 1.5 приведены марки сплавов, химический состав и требования к фольге в зависимости от ее назначения.

Таблица 1.4 – Технические требования к алюминиевой фольге различных потребителей [11]

Марка сплава	Назначение	Толщина, мм	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %	Состояние поставки
1050	Фольга радиаторная	0,060	105	65	10	T
1050	Листы, ленты	0,2-0,5	115	70	12	M
	Бытовая фольга	0,014-0,05	115	70	12	M
8011A	Медицинская упаковка	0,03-0,05	125	75	12	0
8011	Пищевая фольга (кондитерская)	0,007-0,014	120	80	14	H18
8079	Фольга под лакировку	0,012-0,035	140	85	16	H22
3003 8006	Фольга для пищевых контейнеров	0,058-0,068	160	85	14	H24
8006	Фольга техническая	0,13	140	85	20	H22

Таблица 1.5 – Химический состав алюминиевых сплавов для производства фольги (ГОСТ 55375-2012, ГОСТ 618-73, ГОСТ 745-2014)

Марка	Массовая доля, %								
	Основной элемент			Примеси, не более					
	Al	Fe	Si	Ti	Mn	Cu	Mg	Zn	примеси
1050	99,5	0,4	0,25	0,03	0,05	до 0,05	до 0,05	до 0,05	0,03
1050A	99,5	0,4	0,25	0,05	0,05	до 0,05	до 0,05	до 0,07	0,03
8006	основа	1,2-2,0	0,15-0,4	-	0,3-1	0,05-0,3	< 0,1	< 0,1	0,05
8011	97,52	0,6-1	0,5-0,9	до 0,08	до 0,2	до 0,1	до 0,05	до 0,1	до 0,05
8079	основа	0,7-1,3	0,05-0,3	-	-	0,05	-	0,1	0,05
3003	основа	0,7	0,6	-	1,0-1,5	0,05-0,2	-	0,1	0,05

Основными требованиями являются механические характеристики продукции (временное сопротивление разрыву - σ_B , предел текучести - $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение – δ).

Введение более жестких требований к химическому составу связано с необходимостью ее дальнейшей пластической деформации, т.к. заданные механические свойства конечного продукта можно достичь в определенных интервалах и соотношениях легирующих компонентов.

Например, для получения тонкой фольги из сплава 8011 содержание Fe находится в интервале от 0,65 до 0,80 % мас., а при производстве лакированной фольги из сплава 8079 – от 0,75 до 0,9 % мас., при производстве пищевых контейнеров из сплава 8006 от 1,25 до 1,50 % мас.

Основными легирующими элементами являются Fe и Si. Как известно, временное сопротивление разрыву для Al сплавов имеет линейную зависимость от содержания Fe, чем больше его содержание, тем прочнее фольга. Такая добавка как Mn также приводит к росту прочностных характеристик, при этом повышает коррозионную стойкость фольги.

Тонкую фольгу производят, в основном, из сплава 8011. По ГОСТ (табл. 1.5) содержание компонентов находится достаточно в широком диапазоне, при этом для обеспечения заданных механических характеристик фольги приходится жестко контролировать их содержание в соответствии с требованиями заказчика.

Легирующие алюминия железом при определенном соотношении его к кремнию способствует повышению общего уровня механических свойств алюминиевых сплавов 8011, 8079, 8006 по сравнению с техническими марками алюминия А0, А5, А7 за счет измельчения зерна, образования избыточных железосодержащих интерметаллических фаз [15,16].

Легирующие компоненты при высоких температурах растворяются в жидком алюминии. Растворимость в твердом состоянии при образовании твердого раствора для каждого элемента ограничена (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Растворимость элементов и соединений в алюминиевом твердом растворе (по Филиппу, Хансену, Андреко, Ван Горну) [16]

Элемент	Температура эвтектики (E), перитектики (P) С°	Фазы в равновесии с α -твердым раствором	Растворимость, мас. %			
			550°C	400 °C	300 °C	200 °C
Fe	655 (E)	Al ₃ Fe	0,005	0,01	–	–
Si	557 (E)	Si	0,80	0,30	0,10	0,05
Mn	658,5 (E)	Al ₆ Mn	0,35	0,09	0,015	0,0025
Mg	449(E)	Al ₃ Mg	14,50	12,20	6,60	3,50
Cu	548 (E)	Al ₂ Cu	4,03	1,50	0,45	0,13
Ti	665 (P)	Al ₃ Ti	0,20	–	–	–

Не растворившиеся частицы образуют в структуре сплава самостоятельные твердые кристаллы (структурные составляющие) или присутствуют в виде чистых элементов (например, Si, Zn) и интерметаллидных соединений с алюминием (например, Al_6Mn , Al_3Fe , Al_3Mg , Al_2Cu) [16]. В случае совмещенного процесса литья и прокатки для сплавов высоким содержанием Fe при низкой температуре литья в сплавах системы Al-Fe-Si-Mn происходят перитектические и эвтектические превращения.

Мелкодисперсная структура полосы обеспечивает наиболее положительные показатели предела прочности, предела текучести, относительного удлинения, твердости.

На размер зерна, в первую очередь, оказывает влияние скорость охлаждения расплава. Чем она больше, и больше скорость кристаллизации тем короче и менее разветвлённые первичные дендриты.

1.5 Рафинирование расплава при бесслитковой прокатке

Для улучшения качества и очистки алюминиевых расплавов от газообразных и твердых примесей используется печное и внепечное рафинирование. Известно, что любой метод дегазации приводит не только к снижению содержания газа в расплаве, но и к удалению части взвешенных в нем включений. Одновременная с очисткой алюминиевых расплавов от неметаллических включений происходит их частичная дегазация [18].

Существующая взаимосвязь позволяет рассматривать дегазацию и очистку, как разные стороны единого процесса рафинирования.

Рафинирование постоянным электрическим током. Водород в ионизированном состоянии способен образовывать в расплаве сложные комплексы с оксидами, существование которых объясняет теория электростатического взаимодействия. Учитывая этот фактор, возможно

рафинирование алюминиевых сплавов в поле переменного и постоянного электрического тока [18-21].

Более глубокая очистка достигается при воздействии постоянного тока, так как при катодной поляризации струи металла снижается межфазное натяжение на границе расплав-флюс, что способствует повышению эффективности рафинирования [18].

Рафинирование флюсами. Принцип обработка расплава хлоридными хлоридно-фторидными солевыми композициями основан на разнице в смачиваемости контактирующих фаз и переходе неметаллических включений самопроизвольно из металла во флюс. Они способны адсорбировать до 10 % (по массе) оксида алюминия и растворять его до 1 %, при этом удаляется и водород, образующий комплексы с Al_2O_3 [18].

Перспективными дегазирующими флюсовыми композициями рассматриваются карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов и, прежде всего, карбонат кальция [22].

Рафинирование вакуумной обработкой расплава. Вакуумирование алюминиевых сплавов, как метод рафинирования получил широкое распространение в начале 70-х годов. Процесс представляет собой эффективный, простой, недорогой и экологически чистый способ удаления водорода из расплава алюминия. Понижение давления над расплавом вызывает десорбцию газа с поверхности сплава и диффузию нового количества газа к поверхности зеркала расплава и уже имеющимся в расплаве газовым пузырькам. Метод позволяет получать низкий стабильный уровень содержания газа в расплаве, так проведение вакуумирования в миксере позволяет снизить содержание водорода в металле примерно в 2 раза.

Новые принципы вакуумной дегазации предложены в работе [23]. При дегазации больших масс металла целесообразно совмещать вакуумирование с каким-либо фактором, стимулирующим образование зародышей газовых

пузырьков. Такими факторами может быть ультразвуковое воздействие или введение флюсов [24].

Рафинирование ультразвуковой обработкой расплава. Метод ультразвуковой очистки расплавов обладает рядом преимуществ над другими методами дегазации, он не требует больших затрат энергии, экологичный и имеет невысокую стоимость. Ультразвуковая очистка расплавов (УЗО) или Ultrasonic melt treatment (UST) практикуется с 1950 года и известно, что обработка расплавов ультразвуком оказывает значительное влияние на процесс кристаллизации [25-27].

Ультразвуковые колебания ведут к дегазации и, как следствие, к уменьшению пористости [27, 28]; измельчению частиц первичной фазы и зерен [27, 29]; фрагментации дендритов [27, 39]; уменьшению сегрегации и агломерации из-за больших акустических давлений, оказываемое при схлопывании кавитационных пузырьков [27].

Широкий круг исследований по ультразвуковой дегазации металлических расплавов описан в работах Г. И. Эскина и Д. Г. Эскина [24,28, 29, 31, 33-42]. В исследованиях были выявлены закономерности ультразвуковой дегазации легких сплавов на основе алюминия и магния, создано ультразвуковое уникальное оборудование, пригодное для обработки расплава в процессах фасонного и непрерывного литья, разработана технология ультразвуковой обработки расплавов. Интенсивность ультразвукового воздействия на прямую влияет на эффективность удаления газа из жидкого металла.

Ультразвуковая дегазация базируется на кавитации и динамике пузырьков газа. Кавитация – это образование, рост, колебание, коллапс и взрыв пузырька, направленный внутрь жидкости. Зависимость эффективности процесса от вводимой акустической мощности можно охарактеризовать тремя областями (рис.1.10): докавитационный режим I; область начала развития

кавитации II - эффективность дегазации сначала резко возрастает, а затем постепенно стабилизируется; область III - область развитой кавитации.

Применение ультразвуковой обработки при модифицировании расплава эффективно влияет на формирование структуры субдендритного типа (рис. 1.10) [31].

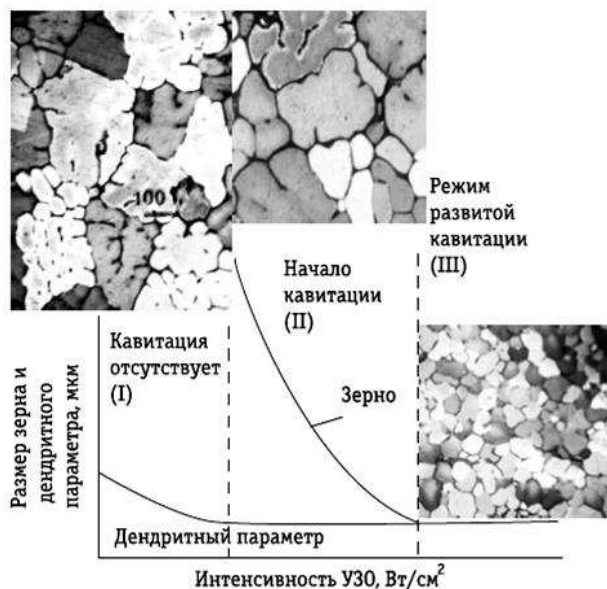


Рисунок 1.10 – Интенсивность ультразвуковой обработки

В жидкости, окружающей пузырьки, создаются экстремальные условия, при этом температура достигает значений более 10000 К [43], давление более 400 МПа [43, 44] и скорость охлаждения более 10¹¹ К/с [45].

В работах Г. И. Эскина [16] оценена эффективность ультразвуковой дегазации по сравнению с другими известными методами удаления газа - рафинированием расплава алюминия хлористыми солями и вакуумированием. Приведены кинетические кривые выделения водорода в сплаве АЛ9 при пониженном давлении, рафинировании хлористыми солями и ультразвуковой обработке (рисунок 1.11).

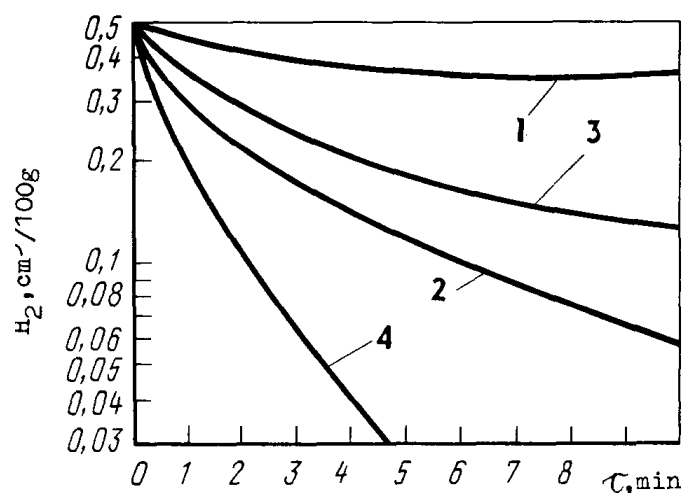


Рисунок 1.11 – Кинетика выделения водорода из расплава (Al-Mg-Si) [24]:

1 - действие хлоридов; 2 - обработка ультразвуком; 3 - вакуумная дегазация; 4 - комбинированная дегазация

Дегазирующий эффект рафинирования солями незначителен. Вакуумирование оказывает больший эффект на дегазацию, чем флюсы, а ультразвук - еще больший. Совместное действие ультразвука и вакуумирования ведет к дополнительному ускорению процесса и снижению предела газонасыщенности сплава. Поэтому совместная обработка расплава ультразвуком и вакуумированием представляет собой один из наиболее перспективных способов получения плотных высококачественных слитков алюминиевых сплавов. Проведенные эксперименты в работе [24] показали возможность эффективного ультразвукового рафинирования расплава при непрерывном литье больших масс расплава в промышленных условиях.

Ультразвуковая обработка является эффективным средством дегазации жидких алюминиевых сплавов, которые могут быть применены для обработки относительно больших объемов. По эффективности, как отмечается в работе [39], этот метод сопоставим с роторной дегазацией алюминия и его сплавов аргоном, широко используемым в настоящее время. Использование ультразвуковой дегазации приводит к меньшим потерям металла во время дегазации по сравнению с роторной дегазацией.

Рафинирование продувкой газами. Это наиболее распространенный способ обработки расплава с целью неметаллических включений снижения содержания водорода. Для продувки используют хлор, аргон, азот, гелий и др. [18].

Механизм очистки заключается в удалении водорода, диффундировавшего в пузырек инертного газа и удалении включений за счет флотирования воздействием на них пузырьков газа. Эффективность очистки увеличивается при уменьшении размер пузырьков и равномерно их распределение в объеме расплава. Общий принцип работы установки дегазации заключается во введении в камеру с помощью одного или более вращающихся продувочных устройств инертного газа, обычно аргона. Инжектор разбивает газ на пузырьки, которые насыщают расплавленный металл. Когда пузырьки технологического газа поднимаются к поверхности расплава, растворенный водород десорбируется из расплава [18].

Рафинирование газами требует повышенных затрат энергии, связанных со снижением температуры расплава металла в процессе обработки, сложностью применяемого оборудования и дополнительных затрат на очистку газов.

Приготовление сплавов с применением электромагнитного перемешивания (ЭМП). Особенностью очистки расплавов непосредственно в печах и миксерах является интенсивное перемешивание алюминиевого расплава без введения рафинирующих смесей (пассивное рафинирование) или с введением в процессе перемешивания газовой или газопорошковой смеси в расплав (активное рафинирование). Разработано достаточно много способов и устройств для ЭМП электропроводных расплавов в печах и миксерах, которые успешно могут применяться и для осуществления печного рафинирования [46].

Приготовление сплавов с применением ЭМП позволяет снизить растворимость водорода в алюминиевом расплаве. Снижение температуры поверхности расплава при применении ЭМП по всей ванне приводит к

уменьшению насыщения расплава водородом. Наиболее распространены в России ЭМП с бегущим магнитным полем производства НПЦ Магнитной гидродинамики [46].

В исследования многих авторов [18, 46-48] отмечается, что наибольшей эффективности рафинирующей обработки расплава, в т.ч. и применительно к БПЛ можно добиться при непрерывном воздействии на него в лотке непосредственно вблизи литейного агрегата. Способы рафинирования, основанные на ультразвуковом воздействии, являются одними из перспективных [24,28, 29, 31, 33-42]. При этом они не уступающий по качеству обработки расплава и производительности роторной дегазации. Положительным эффектом их применения является повышение экологичности и уменьшения потерь металла при рафинировании, уменьшение размера зерна.

1.5 Выводы по главе и постановка цели и задач исследования

Анализ научно-технической литературы позволил сделать следующие выводы:

1. В настоящее время одним из мировых лидеров в области фольгопрокатного производства является ОАО «РУСАЛ- САЯНАЛ», входящее в состав ОК РУСАЛ, которое, не смотря на мировой кризис наращивает объемы поставок на экспорт фольговой продукции из алюминиевых сплавов.

2. В связи с расширением области применения фольговой продукции, в частности под глубокую вытяжку, потребители предъявляют высокие требования по структуре и механическим свойствам.

2. Наиболее эффективными технологиями изготовления фольги из алюминиевых сплавов является беслитковая прокатка с использованием оборудования «FATA HUNTER».

3. Основными дефектами при производстве фольги является дефекты геометрии и внешний вид алюминиевой заготовки для дальнейшей прокатки фольги.

4. Вероятными причинами образования выше указанных дефектов являются:

- химический состав сплава, наличие и количество определенных примесей;
- температурно-скоростные условия литья и кристаллизации;
- геометрические параметры установки БПЛ.

Представленные выводы позволили сформулировать цель работы: анализ причин образования дефектов и разработка рекомендаций по повышению качества алюминиевой заготовки для фольгопрокатного производства

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести литературный обзор по теме исследования и выявить причины образования дефектов и способы их устранения применительно к фольгопрокатному производству на ОАО «РУСАЛ-САЯНАЛ»;

- выбрать методы и методики исследований процесса бесслитковой прокатки, химического состава, микро и макроструктуры, пористости, математического моделирования;

- разработать численную модель БПЛ для определения глубины жидкой лунки, как одного из главных фактора, влияющего на стабильность процесса;

- провести анализ причин образования дефектов при совмещенном литье и прокатке;

- разработать рекомендации по повышению качества фольговой заготовки.

[Изъято 44 страницы]

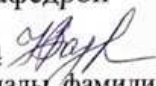
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургия цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Н.В. Белоусова 

подпись инициалы, фамилия
« НВ » НВ 2020г.

Исследование алюминиевой заготовки и анализ причин образования дефектов

тема

22.04.02 Металлургия


код и наименование направления

22.04.02.02 Металлургия цветных металлов

код и наименование магистерской программы

Научный

руководитель



канд. техн. наук, доцент

Е. М. Лесив

подпись, дата

должность, ученая степень

инициалы, фамилия

Выпускник

 02.07.20

подпись, дата

А.Ю. Порайко

инициалы, фамилия

Рецензент АО Русал Саянал, директор по производству



02.07.2020

В.В. Павлов

инициалы, фамилия

Экономическая

часть



канд. эконом. наук, доцент

Т.В.Твердохлебова

подпись, дата

должность, ученая степень

инициалы, фамилия

02.07.2020 инициалы, фамилия

Красноярск 2020