

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

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель магистерской  
программы д-р хим. наук,  
профессор

\_\_\_\_\_ Н.В. Белоусова

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

Разработка мероприятий по повышению качества плоских слитков серии 5xxx

Научный руководитель	_____	к.т.н., доцент	<u>Н.В. Баранов</u>
	подпись, дата	Должность, ученая степень	
Выпускник	_____		<u>И.С. Куликов</u>
	подпись, дата		
Рецензент	_____	Начальник отдела литья ЛЦ БрАЗ ООО «РУСАЛ ИТЦ»	<u>А.В. Данилов</u>
	подпись, дата	Должность, ученая степень	
Консультант экономического раздела	_____	к.э.н., доцент	<u>Т.В. Твердохлебова</u>
	подпись, дата	Должность, ученая степень	

Красноярск 2020

## АННОТАЦИЯ

В настоящее время на многих алюминиевых заводах остро стоит проблема высокого содержания натрия в расплаве алюминия при производстве слитков 5xxx серии. Для снижения натрия в расплаве алюминия многие заводы используют технологии, принцип работы которых заключается в подаче хлора в расплав, что может негативно влиять на условия работы персонала литейного отделения и способствовать образованию неметаллических включений. Диссертация представлена в объеме 71 страницы, включает в себя 8 таблиц, 38 иллюстраций, 4 формулы, а так же список использованных источников, состоящий из 54 источников.

Цель работы: определить влияние величины подачи хлора с помощью установки внепечного рафинирования «SNIF» на величину удаления натрия из жидкого алюминия и показания загрязненности расплава неметаллическими включениями посредством метода LiMCA, PODFa.

Задачи исследования: провести 3 опытные плавки с расходом хлора в камере поточной дегазации SNIF 0,03 кгс/м<sup>3</sup>, 0,07 кгс/м<sup>3</sup> и 0,15 кгс/м<sup>3</sup> и сравнить показатели загрязненности расплава неметаллическими включениями методом LiMCA, PODFa. Сделать выводы о зависимости загрязненности металла неметаллическими включениями от объема хлора, подаваемого в расплав.

Делая вывод о практической применимости диссертационного исследования, можно предположить, что полученный материал может быть использован как четко обоснованная рекомендация к снижению загрязненности расплава алюминия методом ТАС относительно методик рафинирования, заключающихся в подаче хлора большого объема.

Ключевые слова: ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ, НАТРИЙ, РАФИНИРОВАНИЕ, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ, АНАЛИЗАТОРЫ ЧИСТОТЫ МЕТАЛЛА.

## Оглавление

1. ВВЕДЕНИЕ .....	5
2. ОБЗОР СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ СЛИТКОВ 5XXX СЕРИИ, ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ МЕТАЛЛОВ И СОДЕРЖАНИЯ НАТРИЯ НА СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg.....	6
2.1 Обзор технологии производства слитков плоских 5xxx серии.....	6
2.2 Влияние легирующих металлов на сплавы системы Al-Mg .....	13
2.3 Влияние натрия на сплавы 5xxx серии.....	15
2.4 Выводы .....	19
3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В РАСПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ .....	20
3.1 Анализатор чистоты металла PREFIL-Footprinter .....	21
3.2 Общие сведения об анализаторе чистоты металла LiMCA CM .....	22
3.3 Принцип работы анализатора чистоты металла LiMCA.....	23
3.4 Пробоотборная установка PoDFA-f .....	28
3.5 Выводы .....	31
4. ОБЗОР МЕТОДОВ РАФИНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ, НАИБОЛЕЕ ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАВОДАХ.....	31
4.1 Система рафинирования и перемешивания металла в печах «SNIF HD-2000» .....	31
4.2 Общие сведения об установке внепечного рафинирования расплавленного металла «SNIF» .....	34
4.3 Принцип работы установки внепечного рафинирования расплавленного металла «SNIF» .....	35
Выводы .....	37
5. ЭКСПЕРИМЕНТ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ УСТАНОВКИ SNIF НА КАЧЕСТВО ОТЛИВАЕМЫХ СЛИТКОВ 5XXX СЕРИИ.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.1 Технология литья слитков сплава 5052 TC 440-01-97 ..	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.2 Экспериментальное определение влияния параметров работы установки SNIF на качество плоских слитков.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Выводы .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

6. УСТАНОВКА ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА В КОВШЕ «ТАС» В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА АЛЮМИНИЯ БОЛЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ ХЛОРА .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
6.1 Общие сведения об установке ТАС .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
6.2 Конфигурации установки ТАС и устройства удаления шлака .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
6.3 Стандартные металлургические параметры работы установки .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
6.4 Опыт эксплуатации установки заводом ALBA .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
6.5 Трудности ALBA при внедрении технологии ТАС	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Выводы .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
7. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИОБРЕТЕНИЯ УСТАНОВКИ ТАС .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Вывод.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

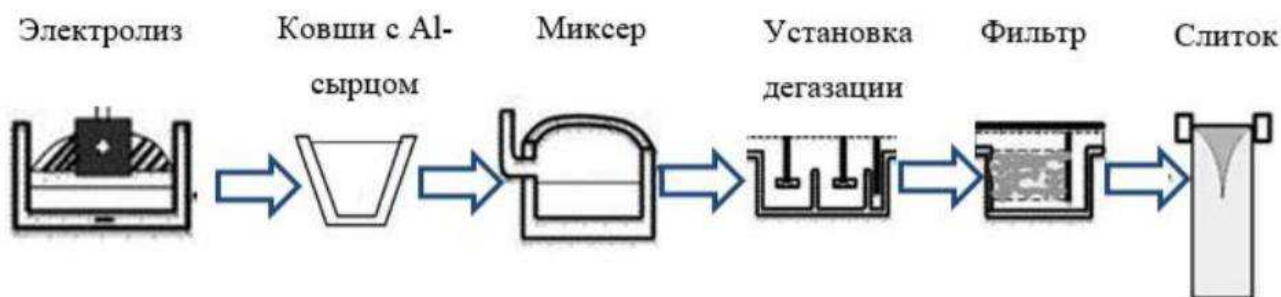
Во время этапов обработки расплава уровень включений может изменяться, и существует множество возможностей регулирования контроля качества на каждом этапе.

Рафинирование расплава долгое время продолжает оставаться важным этапом при достижении необходимого качества расплава для продукции литья [1-2]. Конечное качество металла в плане уровня водорода, щелочноземельных групп, а также размера и концентрации включений оказывает огромное влияние на поведение продукции литья при последующей обработке и конечной службе. Литейные заводы стремятся достичь заданного качества с наименьшими затратами, отвечая в то же время экологическим требованиям и стандартам по безопасности. В прошлом считалось, что достижение высокого качества металла может эффективно контролироваться только путём высоких затрат. За последние 15 лет произошёл пересмотр технологии, используемой для рафинирования расплава в раздаточных печах, частично по причине необходимости увеличить объём производства, снизить стоимость и количество выбросов [3], и частично спровоцированный развитием лучших методов определения качества расплава, а именно, включений, используя PoDFA и LiMCA.

## 2. ОБЗОР СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ СЛИТКОВ 5XXX СЕРИИ, ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ МЕТАЛЛОВ И СОДЕРЖАНИЯ НАТРИЯ НА СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg

### 2.1 Обзор технологии производства слитков плоских 5xxx серии

Основные этапы технологии производства плоских слитков из сплавов алюминия представлены на **Рисунке 2.1**.



**Рисунок 2.1** – Технологическая схема производства слитков плоских алюминиевых

Более подробно технология производства слитков плоских из алюминиевых сплавов выглядит следующим образом:

1. Получение алюминия-сырца в корпусах электролиза;
2. Разливка алюминия-сырца из электролизеров в разливочные ковши и транспортировка металла в ковшах при помощи дизельной техники в литейное отделение;
3. Отстаивание ковша с жидким алюминием на пандусе литейного отделения, учет марки алюминия бригадиром;
4. Взвешивание ковша с помощью крановых весов, регистрация веса бригадиром в компьютерной программе;
5. Заливка алюминия-сырца в поворотный миксер через заливочный карман;
6. Приготовление сплава: добавление легирующих элементов в миксер (шихтовка), рафинирование расплава в миксере, отстой расплава, взятие пробы с миксера для проведения экспресс-анализа в лаборатории, необходимого для определения химического состава расплава (при несоответствии требованиям – подшихтовка, расшихтовка расплава, отстой расплава и повторное взятие пробы на экспресс-анализ);

7. Подготовка оборудования к литью, отливка слитков, контроль содержания химических элементов (отбор проб на химический состав) в расплаве и основных технологических параметров литья (температуры, скорости литья, длины слитка);

8. Осмотр произведенных слитков, контроль габаритов слитка;

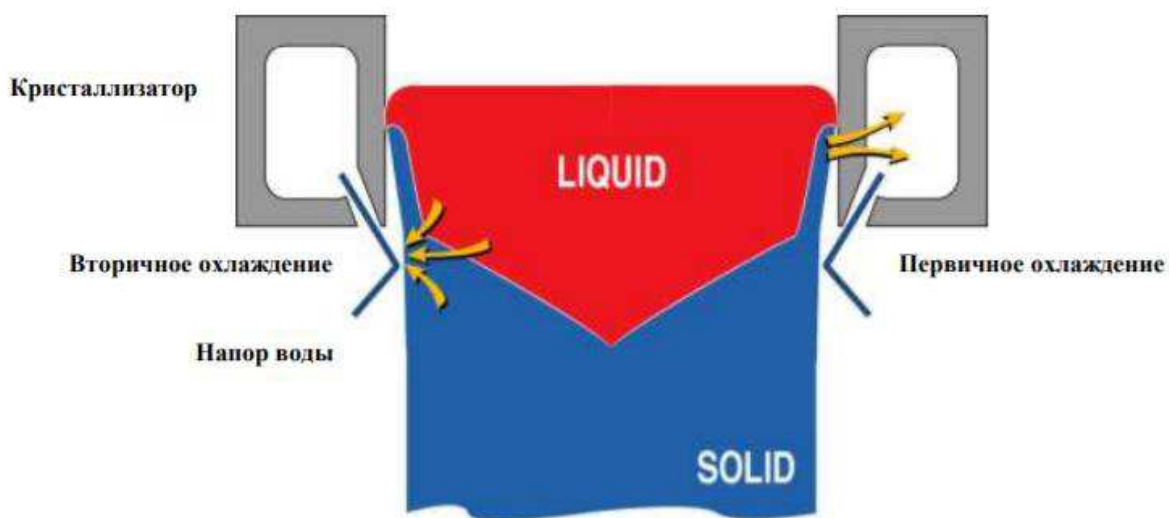
9. Обрезка литников и донников отлитых слитков на пиле «Сермас»;

10. Приемка по качеству слитков специалистами службы качества;

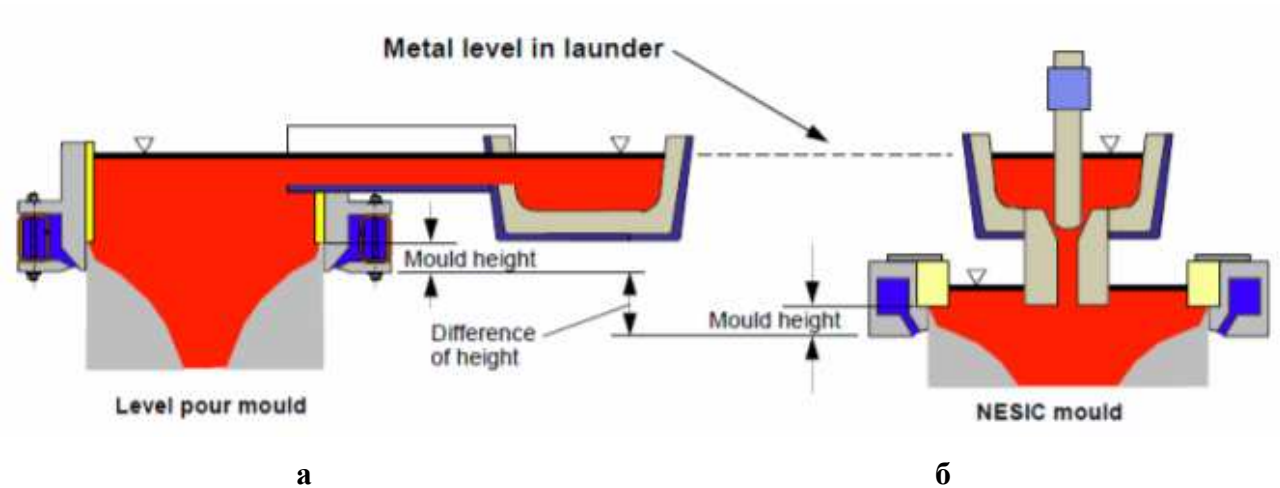
11. Транспортировка слитков на склад готовой продукции;

Слитки из алюминиевых сплавов получают в настоящее время в основном полунепрерывным литьем.

При непрерывном литье слиток перемещается с постоянной скоростью, а фронт кристаллизации остается неподвижным по отношению к кристаллизатору (рисунок 2.2). Различают способы подачи металла в кристаллизатор – горизонтальный и вертикальный (рисунок 2.3) [4-7].



**Рисунок 2.2 – Наглядная схема литья алюминиевых слитков полунепрерывным способом**



**Рисунок 2.3 – Способы подачи жидкого алюминия в кристаллизатор: а-уровневый, б-вертикальный;**

Для производства слитков плоских крупнотоннажных алюминиевых применяется следующее технологическое оборудование:

- электрическая поворотная печь отражательная (миксер);
- машины литейные полунепрерывные;
- оснастка;
- гидроопрокидыватель;
- ковши, предназначенные для заливки алюминия жидкого в миксер;
- весы для статического взвешивания ГОСТ 29329-92, весы типа SKALEX– 500 фирмы «PIVOTEX» или другие, не уступающие по точности взвешивания;
- технологический инструмент;

В производстве слитков плоских 5xxx серии используется каскад из двух миксеров. Миксера установлены на одном уровне (в одном миксере готовится сплав, с другого миксера производится литье). Миксер (Рисунок 2.4) представляет собой поворотную отражательную печь, состоящую из металлического кожуха прямоугольной формы, футерованного огнеупорным кирпичом или неформованным огнеупорным составом. Свод плоский, не съемный, включающий навесные трубчатые нагреватели защищенного типа.





а

б

**Рисунок 2.4 – Миксер поворотный, а-заливочный карман миксера; б-форкамера миксера**

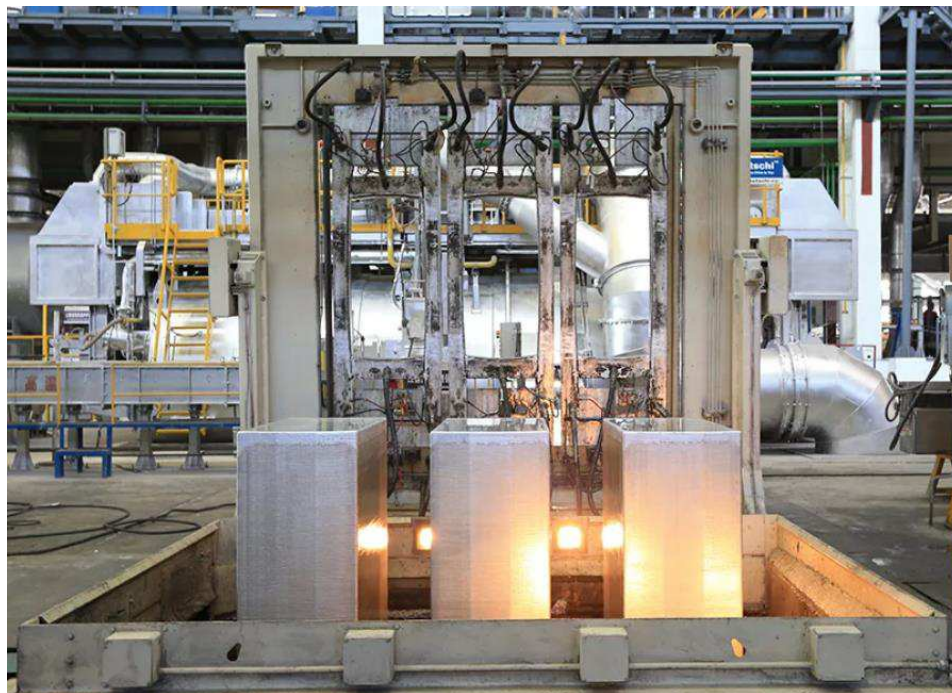
Для осуществления заливки металла, миксер оборудован заливочным карманом (Рисунок 2.4, а) и форкамерой (Рисунок 2.4, б). Летка миксера необходима для перелива металла из миксера в систему металлотракта. Регулировка металла, попадающего в кристаллизатор из миксера осуществляется при помощи лазерного датчика уровня. Заливка в карман миксера производится с помощью разливочного ковша посредством мостового крана и механизма поворота ковша. Контроль, регулировка и регистрация температуры металла в миксере осуществляется при помощи постоянно погруженного в жидкий металл термопреобразователя.

Также миксер оснащен МГД-перемешивателем. Его роль заключается в растворении металлов, добавляемых в миксер для приготовления сплава (перемешивании). МГД-перемешиватель необходим для получения однородности химического состава жидкого металла в миксере.

Литье плоских слитков осуществляется с помощью литейной машины, которая имеет следующие основные узлы (Рисунок 2.5):

- платформа литейной машины с установленными на ней поддонами;
- гидравлическая система;
- литейный стол с установленными на нем кристаллизаторами;

- пульт управления литейной машиной;
- система водного охлаждения;
- направляющие рельсы литейной платформы;
- дренажная система;
- АСУТП.



**Рисунок 2.5 – Стол литейной машины**

Каждая литейная машина снабжена средствами контроля: температуры металла, скорости литья, длины слитков, давления и расхода охлаждающей воды, а также системой сигнализации падения давления или расхода воды.

Оптимальной в плане обеспечения качества отливаемых слитков является литейная машина с гидравлическим приводом, поскольку она обеспечивает хорошую плавность хода рабочего стола, предотвращает проблему перекоса поверхности рабочего стола, и, соответственно, отличное качество поверхности слитков. Недостатками гидравлических машин являются: большая глубина шахты для установки гидравлического цилиндра, сложная для обслуживания система гидропривода, отсутствие возможности использования гидравлической машины для производства слитков непрерывным способом.

К технологической оснастке относятся: кристаллизаторы (формы для литья), поддоны, коллектора и распределительные лотки.

Кристаллизатор (формообразователь) – важнейший элемент оснастки литейного стола. От его габаритов зависит форма и размер отливаемых слитков. Как наружная, так и внутренняя (рабочая) поверхности кристаллизаторов должны быть гладкими, отполированными не иметь заусенец и вмятин. Перед началом эксплуатации кристаллизатор очищают от пригоревшей смазки и накипи не нарушая при этом поверхности кристаллизатора. Наиболее технологичным и эффективным является кристаллизатор с принудительной подачей смазки и двухуровневой зоной подачи воды в начале литья и сниженным уровнем металла, заполняющего кристаллизатор при литье. Такие кристаллизаторы изготавливает американская компания Wagstaff и ИТЦ РУСАЛ (Рисунок 2.5).

Поддон определяет форму донной части слитка и их устойчивость на поддоне в процессе литья. Поддоны изготавливаются из сплавов АМГ, АМЦ, 6061, стали, а также дюралюминия марок Д1, Д16. Поддон должен быть установлен горизонтально по уровню, при этом зазор между кристаллизатором и поддоном не должен превышать 1,0 мм [5].

Коллектор служит для охлаждения и дальнейшей кристаллизации отливаемых слитков путем подачи охлаждающей воды в кристаллизатор [7-8].

При помощи распределительного лотка металл подводится к кристаллизатору через втулку. После окончания литья распределительный лоток необходимо очистить от металла, шлака и окисной пленки.

Порядок производства литья слитков:

- выравнивание поддон с кристаллизатором;
- установка распределительного лотка так, чтобы втулка была расположена по центру кристаллизатора;
- установка комбо-бэга над каждым поддоном;
- подача воды в кристаллизатор для охлаждения;

- запуск механизма поворота миксера;
- заполнение жидким алюминием кристаллизатора на  $1/3$  его высоты и запуск рабочего хода литья.

Поверхность металла в кристаллизаторе должна быть чистой, без шлака, плавно и непрерывно двигаться от центра к периферии. Перед началом литья на внутреннюю поверхность кристаллизатора наносится смазка для снижения смачивания металлом и исключения вероятности остановки движения пленки в начале литья. Смазка во время литья подается автоматически, через отверстия для подачи смазки, расположенные на кристаллизаторах.

Металл из миксера должен поступать к металлотрактору ровным, плавным потоком. Равномерность потока металла регулируется лазером автоматизированно. В случае зависания слитка в кристаллизаторе литье прекращается аварийно. Также запрещено во время литья доливать жидкий металл в миксер и дошихтовывать металл в миксере. Заливка металла в миксер разрешена только после окончания всего цикла литья.

Порядок выполнения операций по окончанию литья:

- вернуть миксер в его исходное положение, летку миксера закрыть огнеупорным материалом;
- слить в изложницу металл, оставшийся в металлотракте, с помощью крана снять распределительный лоток;
- для удаления влаги с кристаллизаторов и поддонов остановить подачу воды на кристаллизаторы и продуть кристаллизаторы сжатым воздухом;
- отводят в сторону раму литейного стола;
- поднять литейный стол;
- извлечь слитки из кессона (колодца) литейной машины при помощи крана с грузозахватным приспособлением (клещами технологическими);
- осмотреть поверхность слитков на качество их поверхности и проверить качество слитка.

Слитки, произведенные из сплавов системы Al-Mg предназначены, в основном, для изготовления плит, листов, лент, литейных форм. Поскольку продукция, произведенная из данного вида сплавов, хорошо поддаются резанию и сварке, заготовки из Al-Mg сплавов находят все более широкое применение. Прочные и стойкие к коррозии, с достаточно высокой прочностью сварного шва, они хорошо зарекомендовали себя в судостроительной отрасли, авиаракетостроении, вагоностроительной промышленности, а также в строительстве [9].

## 2.2 Влияние легирующих металлов на сплавы системы Al-Mg

В сплавах системы Al-Mg образуется несколько интерметаллических соединений. Одно из этих соединений, наиболее близкое к алюминию -  $\beta$ (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>) вступает с твердым раствором на основе алюминия эвтектическую реакцию при температуре 450<sup>0</sup>C (Рисунок 2.6).

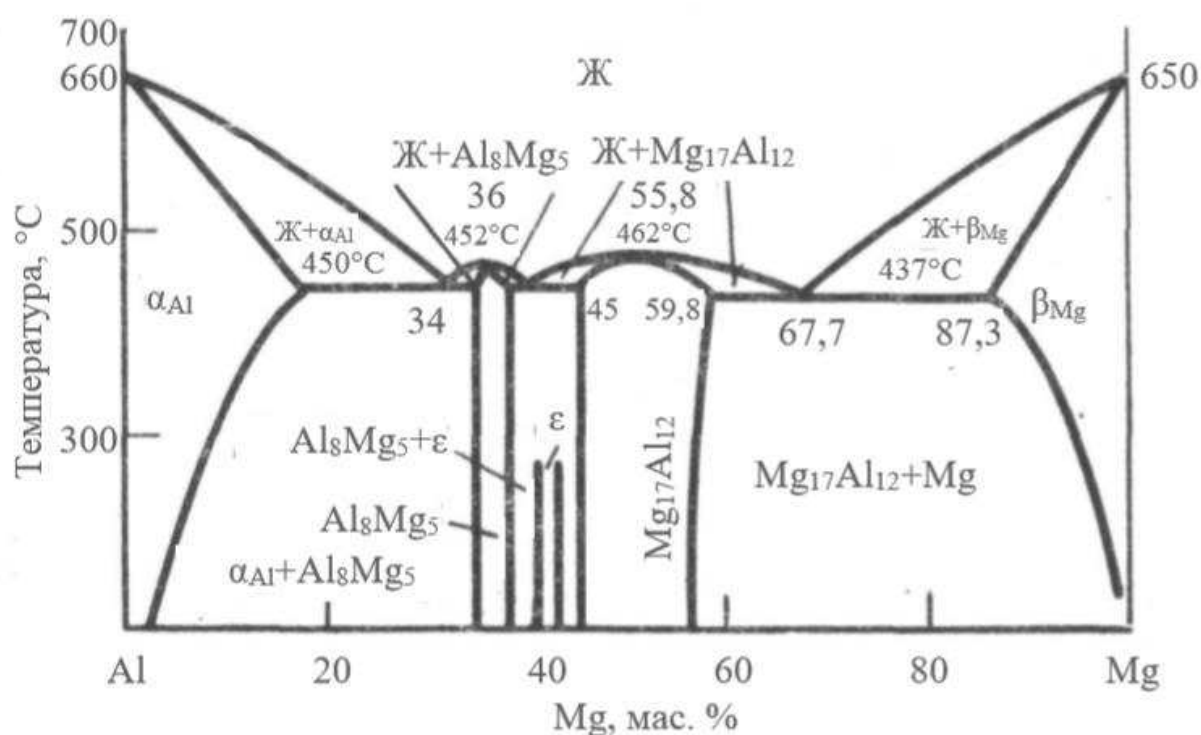


Рисунок 2.6 - Диаграмма состояния системы Al-Mg

Al-Mg сплавы, кроме сплава AMg1, дополнительно легируют марганцем, который, в свою очередь, может создавать соединение с алюминием Al<sub>6</sub>Mn. Промышленные сплавы имеют в своем составе кремний, благодаря этому в их структуре может присутствовать силицид магния

$Mg_2Si$ . При содержании кремния в сплавах железа, марганца и кремния возможно образование соединения  $AlFeSiMn$  [10].

Магний отлично упрочняет алюминий. Каждый процент магния в  $Al-Mg$  сплавах повышает прочность алюминия на 30 МПа. При этом относительное удлинение сохраняется на достаточно высоком уровне при содержании магния до 11...12%. Сплавы с содержанием  $Mg$  до 8%, термически не упрочняются. Только при содержании  $Mg$  более 8%  $Al-Mg$  сплавы упрочняются в результате термической обработки. Однако деформируемые сплавы со столь высоким содержанием магния не применяют, так как при условии концентрации магния более 6%, резко ухудшается коррозионная стойкость, проявляется склонность сплавов к коррозии под напряжением [11-12].

Сплавы системы  $Al-Mg$  широко применяются при изготовлении сварных конструкций. Для повышения механических свойств  $Al-Mg$  сплавы дополнительно легируют марганцем, хромом, титаном и ванадием. Добавка в виде 0,3...0,5%  $Mn$  или 0,1...0,2%  $Cr$  способствует увеличению прочности сплава на 20...25 Мпа [12].

Небольшое содержание ванадия или титана позволяет улучшить свариваемость сплавов. Эти элементы способствуют измельчению зерна в слитке и равномерному выделению  $\beta$ -фазы, в высокой степени снижают склонность сплавов к образованию трещин при сварке и повышают свойства сварных соединений [13].

Медь несколько повышает прочностные свойства сплавов, но существенно снижает коррозионную стойкость, поэтому содержание меди в сплавах типа  $AMg$  не должно превышать 0,05...0,1%. Небольшие добавки цинка (0,4...0,8%) несколько увеличивают предел текучести и сопротивление сплавов коррозии под напряжением. Для сплавов системы  $Al-Mg$  характерно сочетание удовлетворительной плотности, высокой пластичности, хорошей коррозионной стойкости и свариваемости. Все эти качества обусловили их широкое применение для сварных конструкций. Особенно велико значение



сплава АМгб как наиболее прочного из термически неупрочняемых сплавов [10-12].

### 2.3 Влияние натрия на сплавы 5xxx серии

Алюминий технический и сплавы на основе алюминия могут содержать различные примеси. Многие из примесей могут содержаться в сплавах в долях процента, например, в сотых или тысячных. Тысячные доли процента натрия, содержащегося в слитках 5xxx серии, заметно снижают пластические свойства алюминия, увеличивают его окисляемость, и, как следствие, объясняют повышенное содержание водорода и окисных включений в сплаве. Также натрий вызывает интеркристаллитную коррозию при более высоком его содержании.

Наличие одновременно натрия и кальция негативно сказывается на коррозионной стойкости алюминия, поскольку благодаря кальцию в расплаве удерживается большее количество натрия. На поверхности жидкого алюминия они образуют рыхлые пленки окислов, которые, в свою очередь, легко замешиваются в металл. Наличие пленок способствует появлению брака на поверхности слитков, называемого «неслитины» (Рисунок 2.7).

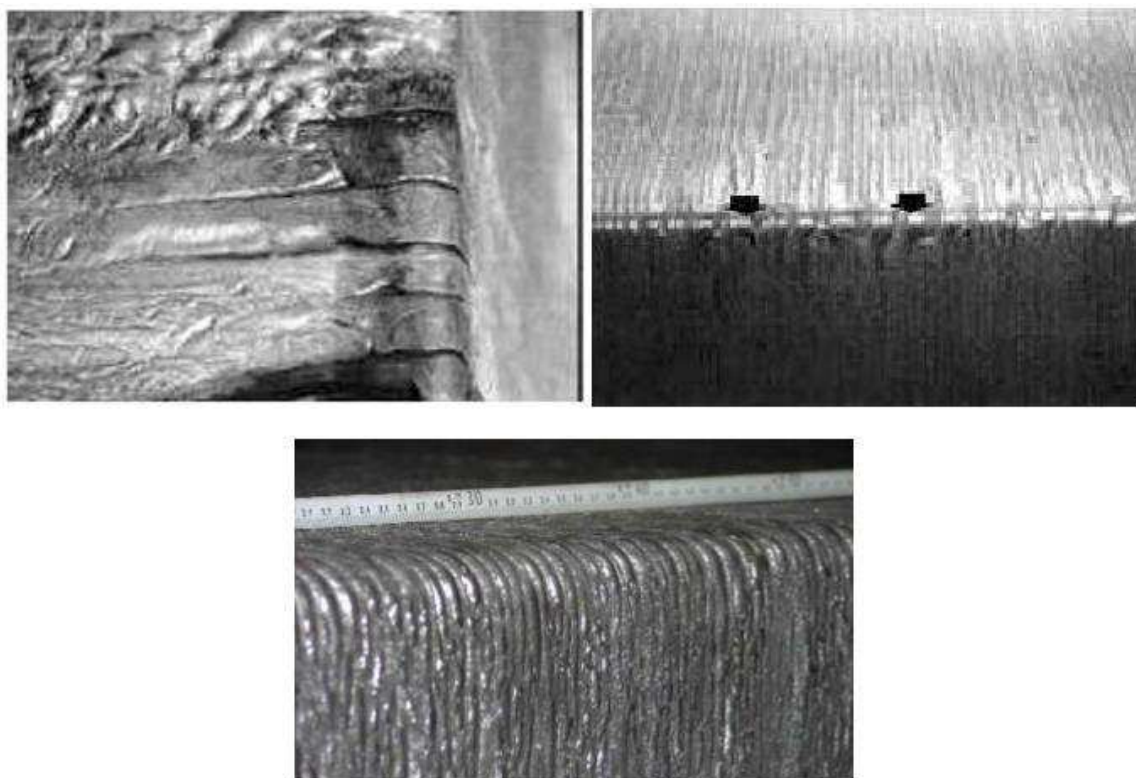
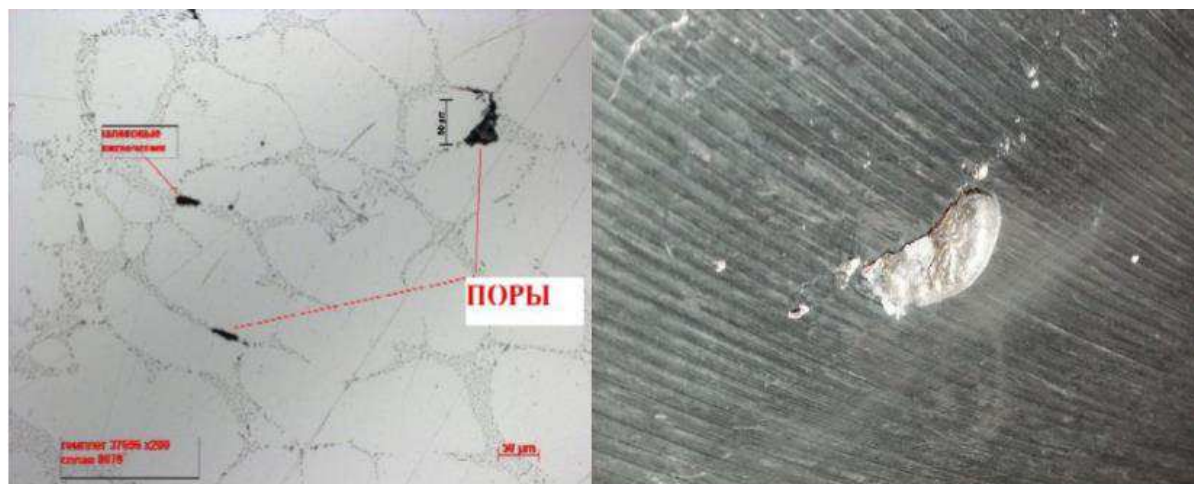


Рисунок 2.7 - Дефект поверхности слитка «неслитина»

Натрий негативно влияет на структуру алюминиевых сплавов: уменьшает их плотность, увеличивает усадку в жидком состоянии и объемные изменения сплавов при кристаллизации. Это способствует увеличению склонности слитков к образованию усадочной пористости (Рисунок 2.8).



**Рисунок 2.8 - Дефект внутренней структуры слитка «Усадочная пористость»**

Также даже ничтожно малое количество натрия (вплоть до тысячных долей процента) оказывают большое влияние на свойства сплавов системы Al-Mg. Натрий может переходить в металл при плавке из криолитсодержащих флюсов.

Максимально вредное влияние натрия оказывает на горячеломкость слитков и пластические характеристики алюмо-магниевых сплавов при горячей деформации. При содержании Na > 0,0015% образуются горячие трещины при литье слитков.

Растрескивание слитков при прокатке, содержащих натрия, происходит по причине межзеренного разрушения металла [14].

Так как растворимость натрия в жидком и твердом алюминии приближена к нулю, при кристаллизации растущие ветви дендритов алюминия оттягивают натрия в междендритные пространства, которые, в свою очередь, обильно обогащаются натрием. На границах дендритов появляются прослойки, состоящие из чистого натрия, имеющие температуру



плавления  $96^{\circ}\text{C}$ . По этой причине сплавы Al-Mg группы, загрязненные натрием, склонны к горячеломкости.

Натрий имеет свойство нейтрализовываться кремнием, который образует соединение  $\text{Al}_m\text{Si}_n\text{Na}_z$ . Хотя, в сплавах, имеющих большое содержание магния, нет свободного кремния, так как он задействован в соединении  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Поэтому Al-Mg сплавы наиболее чувствительны к примеси натрия [15].

Существует возможность попадания натрия в сплав, помимо криолитсодержащих флюсов, также с чушковым алюминием, в котором его содержание составляет от 0,001 до 0,005%, а также с магнием, в котором он допускается до 0,01% и при включении в плавильную печь отходов сплавов с повышенным содержанием натрия.

Содержание натрия в сплаве напрямую влияет на вероятность растрескивания слитков: при его содержании в количестве от 0,0006 до 0,0007% вероятность брака при горячей прокатке может составлять 15-20%. Так, при концентрации натрия 0,0008-0,0009% вероятность растрескивания слитков повышается до 100%. Это одна из главных причин резкого снижения технологичности и брака по трещинам. Поэтому при горячей прокатке слитков алюмо-магниевого сплава регламентировали содержание натрия в них.

Повышенное содержание натрия при температурах горячей прокатки значительно ослабляет границы зерен, и уже при более низких температурах наблюдаются признаки пережога, что свойственно Al-Mg сплавам.

Выделением свободного натрия по границам зерен объясняется горячеломкость сплавов алюминия и магния. Натрий ослабляет границы зерен при температуре горячей деформации в жидком состоянии. Вероятно, также, возникновение легкоплавкой эвтектики с магнием по границам зерен. Для устранения пагубного влияния натрия на качество слитков имеет место ввод в сплав элементов, связывающих натрий в соединения, температура

плавления которых выше температуры горячей деформации сплава. Наиболее эффективной является добавка висмута ( $\approx 0,005\%$ ) [16].

Сплавы, содержащие более 5% магния отливаются с обязательной отливкой алюминия на поддон. Такие слитки при несоблюдении требований к отношению содержания железа/кремния подвержены поверхностным трещинам. При преобладании железа над кремнием не менее 0,05% фактически полностью устраняет брак по поверхностным трещинам. По причине высокой окисляемости таких сплавов существует необходимость наблюдения за поверхностью жидкого металла в кристаллизаторе, не позволяя образовываться разрывам и заворотам окисной пленки.

При загрязнении натрием сплавы рафинируют и покрывают карналлитовым и бариевым флюсами для предотвращения угара магния.

Процесс рафинирования очень важен для достижения качества расплава для продукции литья, требуемой потребителем и предполагает процесс улучшения качества сплава путем максимально возможного снижения в расплаве примесей, например, натрия. Конечная концентрация вредных примесей оказывает значительное влияние на свойства готового сплава при литье и последующей обработке продукции.

Для алюминиевых сплавов существуют общие проблемы, это: газонасыщенность, нахождение окислов металлов и их соединений, нерастворимых в алюминии. При разработке мероприятий, направленных на повышение качества расплава алюминиевых сплавов, необходимо знать и учитывать наследственные параметры расплавов. Для деформируемых алюминиевых сплавов, в частности, системы Al-Mg, наличие в расплаве натрия более 0,0005% крайне нежелательно.

Исследование влияния наследственности строения жидкого расплава на структуру и свойства отлитой продукции позволяют значительно облегчить решение задачи получения отливок с регламентируемой структурой [17].

## 2.4 Выводы

Проведя литературный обзор, мы ознакомились с технологией производства слитков плоских 5xxx серии и оборудованием, применяемым для производства данных слитков.

Из приведенных выше исследований было установлено влияние легирующих металлов на свойства получаемой товарной продукции (слитки плоские системы Al-Mg).

Также было проведено исследование влияния натрия как примеси, содержащейся в алюминиевых сплавах 5xxx серии, на свойства алюминиевых слитков. Было выявлено крайне пагубное влияние натрия на качество отливаемой продукции и установлено, что даже ничтожно малое количество натрия (вплоть до тысячных долей процента) оказывает большое влияние на свойства сплавов системы Al-Mg.

### **3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В РАСПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ**

Наличие включений в алюминиевых сплавах является важной проблемой производителей алюминиевой продукции. Контроль чистоты алюминиевых расплавов является неотъемлемой частью современных требований к контролю качества на современных литейных цехах предприятий алюминиевой отрасли, особенно в производстве тонких листов либо продукции с высокими требованиями к поверхности (стенка и дно банки, фольга, анодирующие или литографические пластины).

Включения представляют собой твёрдые частицы, присутствующие в алюминии при температуре выше ликвидуса. Типичными включениями в алюминии являются окисные плёны, шпинели, остатки модификатора, карбиды, соли и бориды. Удаление включений из алюминиевых расплавов является важной задачей литейного производства. За последние два десятилетия требования к качеству алюминиевой продукции существенно возросли, особенно в части допустимого содержания включений. Для выполнения этих требований были внедрены сложные дорогие многоэтапные системы непрерывной обработки расплава. Эти системы используют вращающиеся импеллеры, насыпные фильтры, фильтрацию крупной сеткой и пенокерамическими фильтрами.

Существует ограниченное количество методов непрерывного измерения, пригодных для контроля технологического процесса, которые давали бы информацию о включениях в расплаве, в том числе об их размерах, распределении и типах. Лабораторные методы, уровень брака и отзывов покупателей недостаточно для поддержания требуемого качества металла.

Сегодня рынок диктует производителям алюминиевой продукции требования по исследованию и управлению качеством расплавов. Это необходимо не только для краткосрочной экономии затрат и решения проблем, но и для устойчивого развития в условиях быстро меняющегося мира.

### **3.1 Анализатор чистоты металла PREFIL-Footer**

Прибор PREFIL-Footer предоставляет немедленную оценку чистоты расплава, и одновременно пробу для металлографического анализа. [18-21] PREFIL-Footer использует для измерения качества расплава измерение скорости прохождения металла через пористый фильтр-диск при постоянной температуре и давлении. Этот прибор представлен на Рисунке 3.1.



**Рисунок 3.1 – Анализ чистоты металла PREFIL-Footer**

Во время отбора пробы прибор непрерывно измеряет массу отфильтрованного металла в приемном тигле и отображает график накопленной массы по времени. Чем чище металл, тем выше будет график;

включения в металле, такие как окисные пленки, засоряют поверхность фильтра, снижая скорость прохождения расплава. Крутизна и форма графика накопленной массы металла по времени даёт информацию об уровне включений в расплаве.

Остатки металла на фильтре могут быть использованы для дополнительного металлографического анализа по технологии PoDFA.

### **3.2 Общие сведения об анализаторе чистоты металла LiMCA CM**

Прибор LiMCA (Liquid Metal Cleanliness Analyser – Анализатор чистоты расплавленного металла), используется для непрерывного контроля чистоты металла во время литья. За прошедшие годы прибор стал популярным инструментом для измерения количества и размера включений в расплавленном алюминии. LiMCA обеспечивает точные измерения уровня включений в расплаве.

Прибор напрямую измеряет количество и размер непроводящих частиц, взвешенных в алюминиевом расплаве, и выполняет непрерывный анализ объёмного распределения этих включений [22-24, 26, 29, 31]. Важным преимуществом прибора LiMCA является то, что это полностью объективный метод, исключая человеческий фактор.

Прибор, оборудованный электроникой для обработки сигналов и данных, может определять плотность и объём распределения частиц в расплаве, анализируя частоту и распределение амплитуд колебаний напряжения. Плотность частиц отображается числом (индексом чистоты) в тысячах частиц на килограмм расплава (К/кг). Он также может быть отображен на графике в виде функции по времени в течение процесса литья. Объёмное распределение частиц обычно показывается в виде гистограммы, отображающей плотность частиц по интервалам размеров частиц.

Прибор LiMCA идеально подходит для применения в отработке технологии, контроле технологического процесса и контроле качества [25, 27-28, 30]. Он показывает чистоту расплава с интервалами в 1 минуту. Следовательно, он не только обеспечивает практически непрерывные

измерения, но также может показывать изменения чистоты расплава в процессе литья, в зависимости от параметров процесса и обработки расплава. Легко определяется влияние на чистоту расплава таких операций, как подготовка печей, легирование, перемешивание, отстаивание и других. Влияние таких рутинных явлений, как регулирование уровня расплава и завихрения потока металла, можно оценить сразу же, как только они произошли. Время начала выброса включений из раздаточного миксера в конце выливки может быть определено для различных параметров процесса литья, что позволит литейщику остановить литьё в оптимальное время.

Непрерывное измерение включений очень важно; при его отсутствии необходимые изменения в технологическом процессе не могут быть выполнены своевременно. Наиболее сложной задачей является определение малых концентраций включений в алюминиевых расплавах. Они часто бывают меньше 1 ppm по объёму. Эти включения имеют размеры от 1 до 500 микрон.

### **3.3 Принцип работы анализатора чистоты металла LiMCA**

Прибор LiMCA проводит непрерывные измерения размера и плотности включений в алюминиевом расплаве на основе принципа Электрочувствительной зоны (ЭЧЗ), по которому присутствие непроводящих частиц определяется по их местному влиянию на электропроводность проводящей жидкости, в которой они взвешены [20-22].

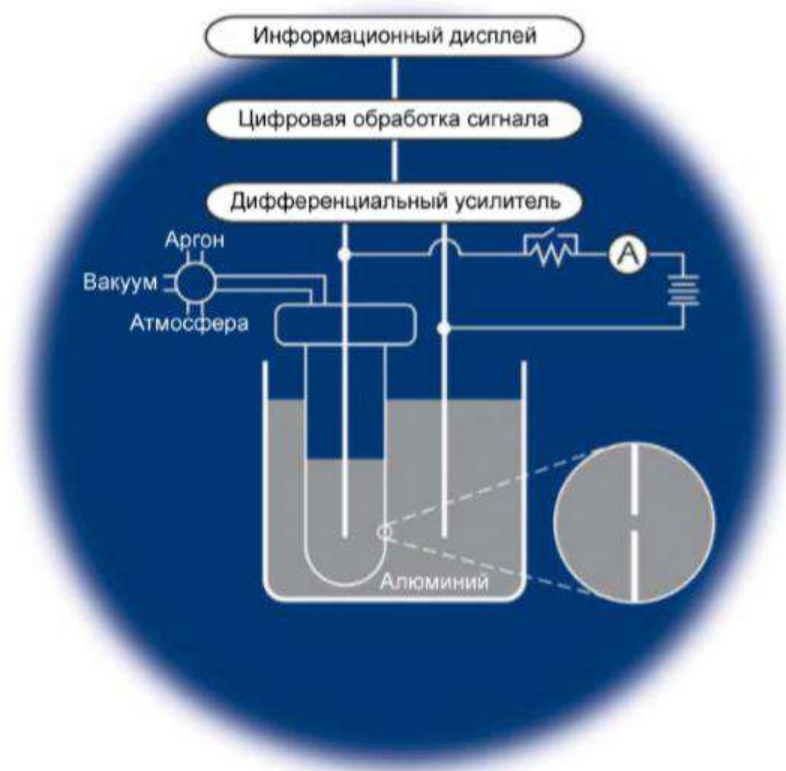
Первое поколение анализаторов LiMCA было создано компанией ALCAN в 1986 г. Второе поколение, известное под именем LiMCA II, было представлено в начале 1990х гг. Третье поколение, поставляется под названием LiMCA CM (Continuous Monitoring – непрерывное измерение). На Рисунке 3.2 показаны фотографии прибора LiMCA CM.



**Рисунок 3.2 - Анализатор чистоты непрерывного измерения «LiMCA CM»**

В точке отбора пробы в поток расплава вводится трубка с небольшим отверстием (290-310 мкм). Внутри трубки создается отрицательное давление для закачивания расплава через отверстие. Материал трубки электроизолирующий. Есть два электрода: один внутри трубки, другой снаружи. Оба электрода погружены в расплав (Рисунок 3.3). Между электродами возникает постоянный электрический ток, который проходит через расплав в маленьком отверстии трубки. Наличие частицы в потоке расплава, при прохождении её через отверстие, изменяет электрическое сопротивление, наблюдаемое на отверстии.





**Рисунок 3.3 - Принцип работы анализатора чистоты непрерывного измерения «LiMCA CM»**

В действительности, когда частица входит в отверстие, она замещает своим объёмом часть проводящей жидкости, обеспечивая временное увеличение электрического сопротивления на отверстии. Это изменение сопротивления в присутствии постоянного тока вызывает изменение напряжения длительностью, примерно равной времени прохождения частицы через отверстие. Напряжение постоянного тока изменяется в зависимости от сопротивления каждый раз при прохождении частиц через отверстие. Электроника определяет размер частицы по изменению напряжения, вызванному её присутствием. Величина изменения зависит от объёма частицы.

Амплитуда изменения напряжения является, в первом приближении, пропорциональной объёму частицы. Величина изменения напряжения определяется Формулой 3.1:

$$\Delta V = \frac{4I\rho d^3}{\pi D^4} \quad (3.1)$$

Где:

$\Delta V$  - амплитуда изменения напряжения

$I$  - сила тока (А)

$\rho$  - электрическое сопротивление жидкости ( $\Omega$ -м)

$d$  - эквивалентный сферический диаметр частицы (м)

$D$  - диаметр отверстия в трубке

Количество и величина колебаний даёт информацию о количестве включений и объёмах включений. Как только отбор пробы был завершён, металл под действием повышенного давления выдавливается из трубки и начинается отбор новой пробы металла через отверстие под действием пониженного давления.

Этот процесс повторяется каждую минуту. Результаты приводятся в виде коэффициента концентрации. Коэффициент концентрации показывает количество включений больше заданного диаметра в тысячах на кг металла, например,  $N_{20} = 5,0$  шт/кг. Результаты отображаются сразу после их получения. Возможно использование двух таких приборов до и после системы обработки расплава.

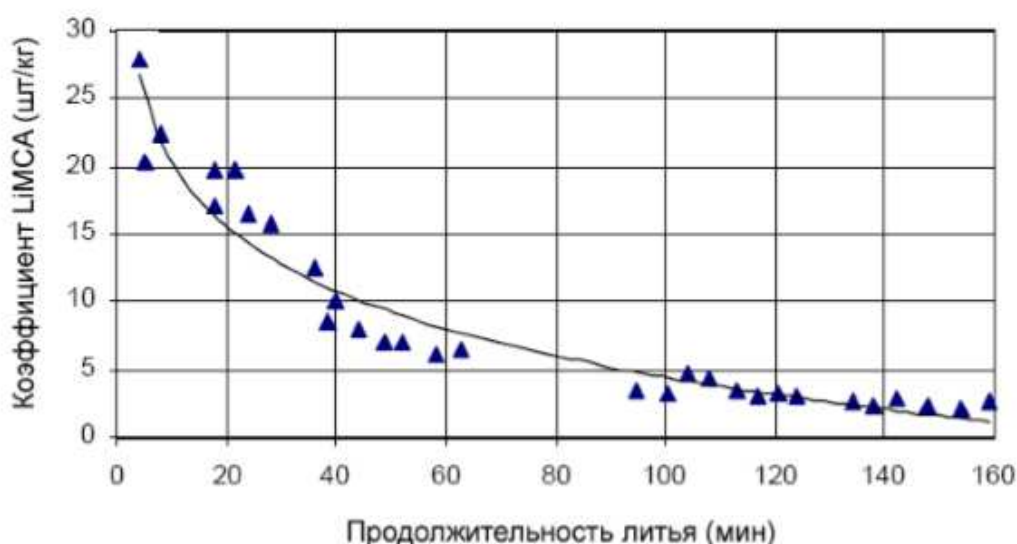
Преимущества использования прибора LiMCA

Прибор LiMCA быстро сообщает количественную информацию. Это позволяет оператору быстро изменить порядок отбора пробы или параметры процесса литья. С учётом потребностей по непрерывному измерению содержания включений, новый анализатор LiMCA CM сконструирован для работы в стационарной точке 24 часа 7 дней в неделю. Прибор может передавать результаты измерений по сети при минимальном вмешательстве оператора.

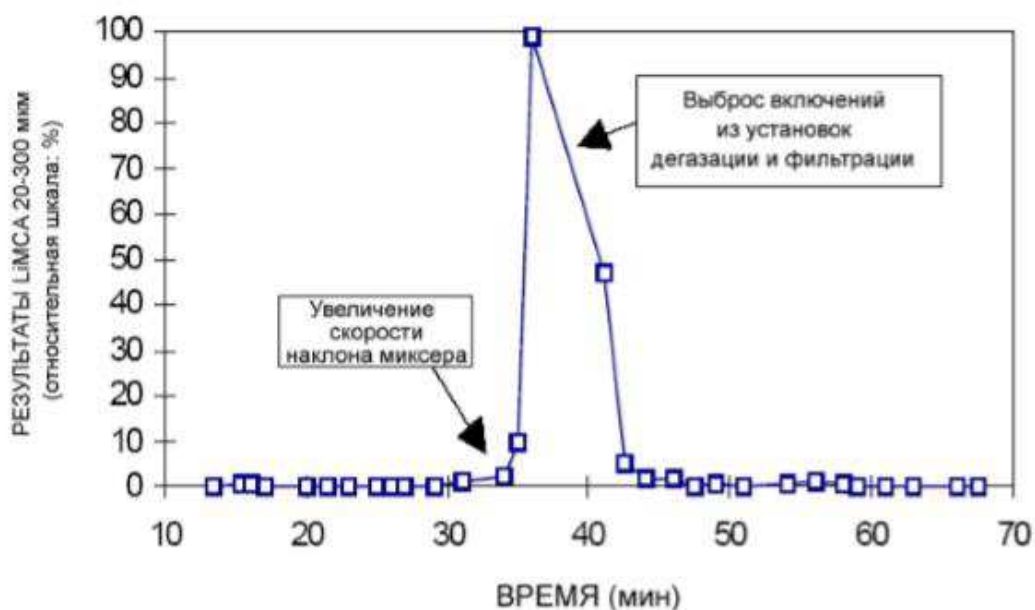
Прибор LiMCA CM может быть интегрирован в производственный процесс. Его устойчивость и надёжность соответствует условиям на производстве. Он нуждается в минимуме технического обслуживания.

LiMCA предоставляет экспресс-результаты измерения качества расплава на основе объективного и независимого от пользователя метода. Он идеально подходит для отработки технологии, контроля процесса, контроля качества.

На Рисунке 3.4 приведён пример результатов измерений LiMCA, показывающих влияние осаждения на чистоту алюминия. Рисунок 3.5 показывает изменение чистоты металла, по результатам анализатора LiMCA при увеличении скорости наклона миксера. Последовавшие изменения в процессе привели к выбросу включений.



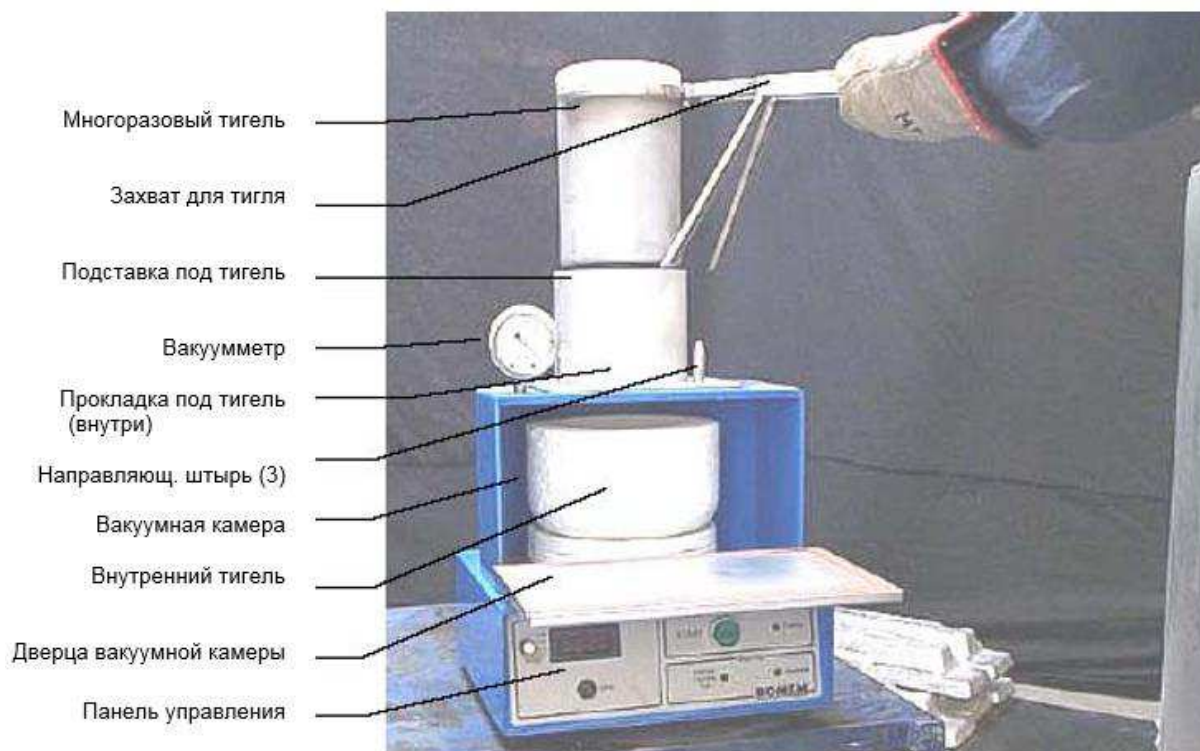
**Рисунок 3.4 - Влияние осаждения на чистоту расплава**



**Рисунок 3.5 - Выброс включений при внезапном изменении уровня металла во время литья**

### 3.4 Пробоотборная установка PoDFA-f

Пробоотборная установка PoDFA-f предназначена для анализа чистоты металла. Она позволяет определять как природу, так и концентрацию включений в алюминии и его сплавах [31]. Установка проста в эксплуатации, идеальна для литейного производства в качестве основного инструмента контроля за технологией и улучшением качества продукции, т.к. она переносная и не требует много времени для сборки. На Рисунке 3.6 показана переносная пробоотборная установка PoDFA-f, а также сопутствующее оборудование. Прибор состоит из двух частей. Верхняя часть представляет собой вакуумную камеру, нижняя часть содержит измерительные приборы [32].



**Рисунок 3.6 - Пробоотборная установка PoDFA-f**

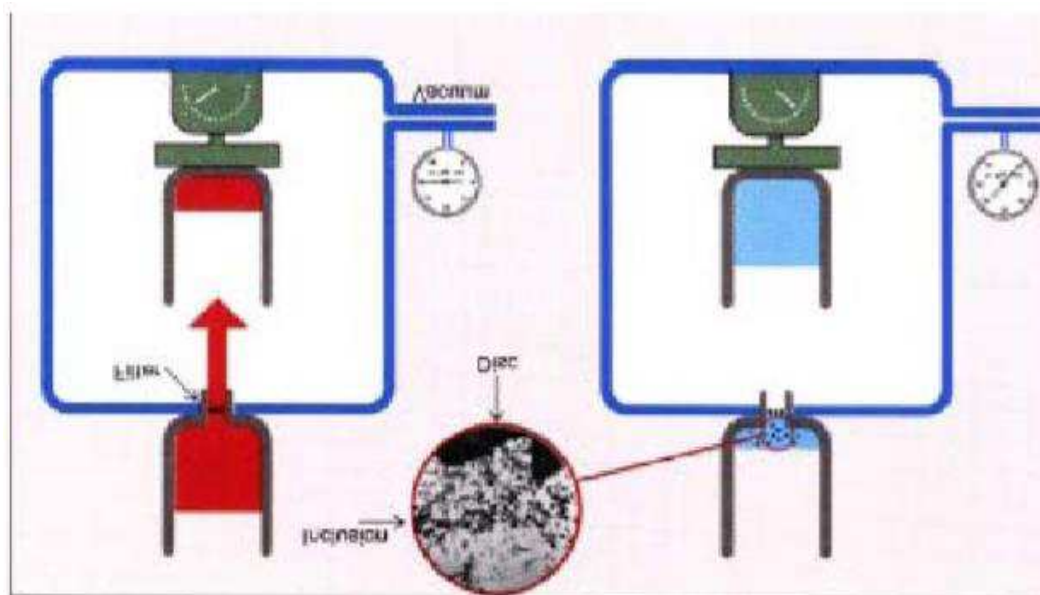
Аббревиатура PoDFA-f означает Porous Disk Filtration Apparatus – foundry model (прибор пористой фильтрации – для литья) [31]. В переносной пробоотборной установке PoDFA-f через пористый фильтр, расположенный на дне многоразового тигля, пропускается определенное количество жидкого металла. Для этого используется частичный вакуум. После застывания металла, с помощью металлографического анализа можно определить природу и количество включений, осевших на поверхности фильтра [33].

Пробоотборная технология PoDFA-f имеет очень большое значение для минимизации включений. Например, с помощью анализа PoDFA-f можно определить эффективность разных методов подготовки жидкого металла с точки зрения их влияния на чистоту. Можно определить включения, образующиеся во время подготовки жидкого металла и вовремя внести поправки, чтобы минимизировать их образование [34-35].

На Рисунке 3.7 показан принцип работы установки PoDFA-f. Жидкий металл для пробы сначала отбирают в предварительно разогретый пробоотборный ковш, а затем переливают в тигель установки PoDFA. Тигель

помещают в верхней части вакуумной камеры, выверив его положение относительно отверстия (см. левую часть Рисунка 11). В вакуумной камере создается вакуум, и под действием перепада давления металл проходит сквозь пористый фильтр. Включения и оксидные пленки, распределенные в металле, задерживаются на поверхности фильтрующего элемента. Во время фильтрации на весах отображается масса отфильтрованного металла [32, 35].

Как только заданная масса отфильтруется, давление в вакуумной камере автоматически возвращается к атмосферному (см. правую часть Рисунка 11), тем самым, завершая процедуру пробоотбора. Остаточный металл или концентрат оставляют до остывания и затвердения. После того, как проба затвердеет, ее вместе с фильтром осторожно вынимают из тигля, обрезают и передают в лабораторию. Исследуя поперечный срез остатка с помощью оптического микроскопа, специалист лаборатории, прошедший обучение для проведения анализа PoDFA, определяет различные типы включений и измеряет общую концентрацию включений на 1 кг фильтрованного металла ( $\text{мм}^2/\text{кг}$ ) [34].



**Рисунок 3.7 - Принцип работы установки PoDFA-f**

Переносная пробоотборная установка PoDFA-f разработана с учетом применения многоразового тигля и переносного нагревателя для него. Все представлено на Рисунке 12. Многоразовый тигель с установленным

фильтрующим элементом необходимо всегда предварительно нагревать, чтобы металл не застыл в фильтрующем элементе до того, как будет достигнута уставочная масса [34, 37].

Нагреватель для тигля состоит из электрического нагревательного элемента, заключенного в защитный цилиндр из нержавеющей стали. Многоразовый тигель ставят на нагревательный элемент дном вверх. Настраиваемый таймер автоматически прекращает нагревание по истечении заданного времени. С помощью переносного нагревателя многоразовый тигель можно нагревать в течение 50 минут. Тигель подготовлен к получению жидкого металла, когда фильтрующий элемент в нем покраснеет [38].

### **3.5 Выводы**

Проведя литературный обзор, мы ознакомились со способами определения неметаллических включений в расплаве алюминия.

Были рассмотрены принципы, особенности работы установок и методы определения неметаллических включений в расплаве при работе с каждой из описанных установок.

## **4. ОБЗОР МЕТОДОВ РАФИНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ, НАИБОЛЕЕ ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАВОДАХ**

### **4.1 Система рафинирования и перемешивания металла в печах «SNIF HD-2000»**

На Рисунке 4.1 представлена Установка SNIF HD-2000.





**Рисунок 4.1 – Система рафинирования и перемешивания металла в печах  
SNIF HD-2000**

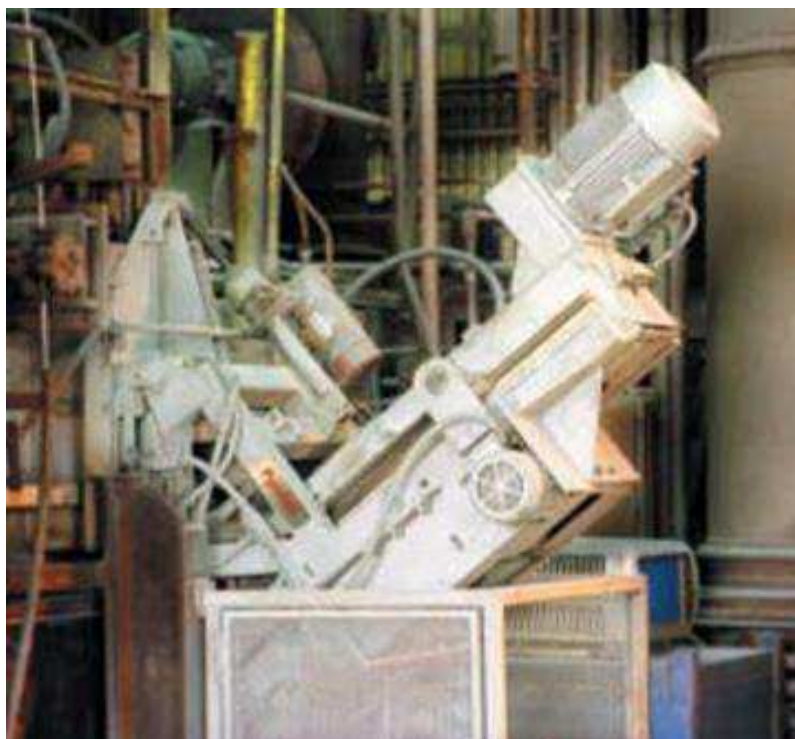
Система SNIF HD-2000 обеспечивает автоматическую обработку металла в печи и является безопасной, эффективной альтернативой ручному использованию флюсовальных трубок. Имея встроенный дегазационный ротор пропеллерного типа, установка обеспечивает проведение непрерывной циркуляции и дегазации расплава [39].

Водород – это единственный газ, который может значительно растворяться в расплавленном алюминии. Опасность наличия водорода в расплаве заключается в том, что при концентрации водорода в жидком алюминии уже при 0,15 мл/100 г происходит образование пор в теле плоских слитков. Для снижения содержания водорода и рафинирования металла, система SNIF HD-2000 подает рабочий газ под поверхность расплава, благодаря этому увеличивается эффективность работы установки и снижаются выбросы. В нерабочем положении ротор и вал полностью выведены из печи. Для работы вал и пропеллерный ротор приводятся в



рабочее положение. Установка обеспечивает максимальное перемешивание и эффективную дегазацию металла расплава благодаря полному погружению ротора в расплав алюминия.

Существует возможность установки SNIF HD-2000 на боковой стенке печи металлургической (Рисунок 4.2) литейного отделения №3 «ПАО РУСАЛ Братск».



**Рисунок 4.2 - Пример установки SNIF HD-2000 на боковой стенке печи.**

Принцип работы данной установки заключается в подаче флюса вместе с аргоном в находящийся в печи расплав. Газ-носитель флюса (аргон) также служит для удаления водорода.

Перемешивание роторами повышает скорость перемещения масс и прохождения реакций удаления водорода [39]. В огромных печах может потребоваться более одного ротора.

## **4.2 Общие сведения об установке внепечного рафинирования расплавленного металла «SNIF»**

Следующая стадия приготовления сплава – обработка расплава в миксере 3-х ступенчатой (секционной) установкой внепечного рафинирования расплавленного металла «SNIF».

Главной целью поточного дегазатора является удаление растворенного водорода, натрия и кальция из расплава как можно ближе к литейной машине.

Главным источником водорода является сгорание природного газа или мазута в раздаточных печах. Высокая влажность окружающей среды является другим источником водорода, особенно в жаркие летние месяцы. Проблема заключается в быстром снижении растворимости водорода по мере застывания металла во время литья; водород выходит из раствора, что служит причиной таких проблем литья, как коробление и отслаивание в тонкостенных профилях и образование газовых пузырьков на отливках.

Очистка расплава производится методом продувки газами через вращающиеся роторы. В 1 и 2 камерах происходит очистка хлор-аргонной смесью, в 3 камере – аргоном [39].

Водород удаляется из расплавленного алюминия посредством барботирования инертного газа через металл. В качестве инертного газа используется аргон. Роль хлора – максимально возможное удаление несмачиваемых включений и примесей щелочных металлов из расплава алюминия. Снижение содержания несмачиваемых включений на пятьдесят процентов (50%) является типовым показателем в системах дегазации [39].

Включения в расплавленном алюминии могут появляться в результате процессов плавления, переплавки в печах или применения специальных добавок (например, добавок, измельчающих зерно). Включения могут привести к разрывам и дефектам поверхности прокатных листов, образованию газовых пор в фольге и повышенному износу пресс-формы во время экструзионного прессования.

### 4.3 Принцип работы установки внепечного рафинирования расплавленного металла «SNIF»

Инертный газ (аргон), вводится в камеру с помощью одного или более вращающихся продувочных устройств (Рисунок 4.3). Инжектор расщепляет газ на пузырьки, которые насыщают расплавленный металл. Пузырьки аргона действуют как приёмник для растворенного водорода. Когда пузырьки технологического газа поднимаются к поверхности расплава, растворенный водород десорбируется из расплава. Добавление небольшого количества хлора в технологический газ ломает связь между алюминием и любыми присутствующими несмачиваемыми включениями, давая возможность поднимающимся пузырькам газа прилипать к включениям и перемещать их к поверхности расплава.

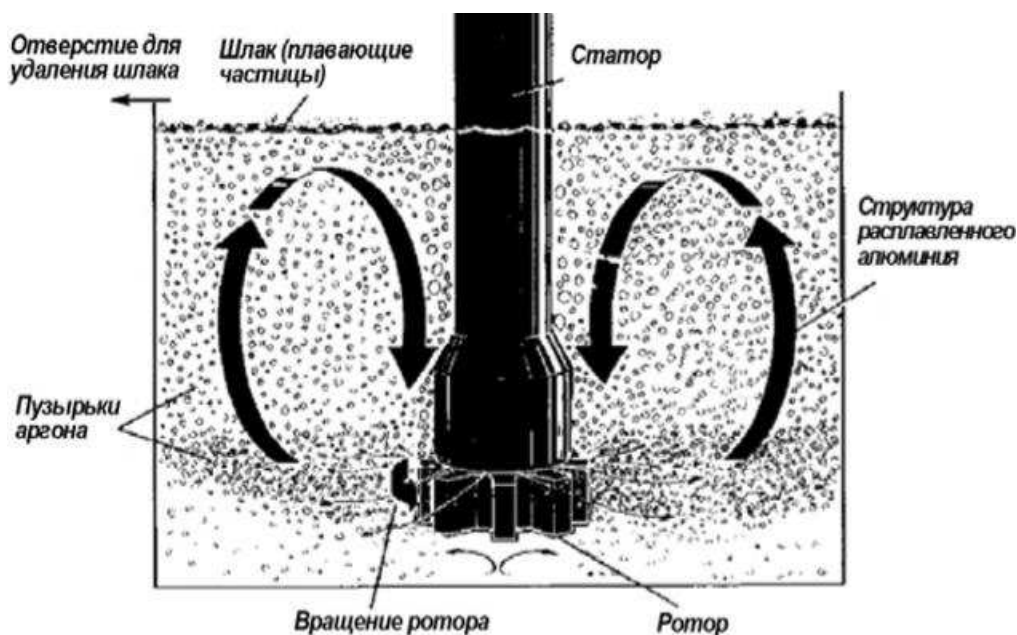


Рисунок 4.3 - Принцип работы проточной системы дегазации «SNIF»

В определенных пределах количество хлора, которое должно быть добавлено в дегазатор, определяется количеством поступающих из раздаточной печи включений и щелочных металлов. Обычно в технологический газ добавляется малое количество хлора (не более 0,5%), чтобы осушить шлак в пределах системы дегазации и способствовать удалению включений. Дополнительный хлор может быть добавлен к

технологическому газу, чтобы химически взаимодействовать с поступающими щелочными металлами.

Присутствие «запаха хлора» вокруг дегазатора при очистке хлором является показателем того, что хлор добавляется в избыточном количестве.

Эффективность дегазации зависит от способности поточной системы полностью насыщать расплав мелкими пузырьками, чтобы максимизировать продолжительность обработки, поддерживая «плоскую» поверхность расплава, что позволяет включениям и солям всплывать к поверхности и отделяться от жидкого алюминия. Конструкция продувочного устройства (инжектора), расход технологического газа и конфигурация камеры емкости – это факторы, которые должны быть согласованы для достижения оптимальных результатов. Продувочное устройство (или устройства) должно инжектировать достаточное количество технологического газа через камеру емкости, не вызывая завихрение металла. Чрезмерная частота вращения ротора без адекватного перемешивания в камере может вызвать завихрение расплава, что потенциально позволит водороду и шлаку, которые всплыли на поверхность расплава, перемешиваться в расплав [39].

Соответствующая продолжительность реакции пузырьков в очистительной камере является другим параметром, который способствует эффективной дегазации. Скорость потока металла и, соответственно, рассчитанная продолжительность обработки в емкости, является фактором, который необходимо учитывать при выборе установки дегазации, но более глубокая емкость также позитивно влияет на эффективность дегазации. Чем глубже газ вводится в расплав, тем больше времени требуется пузырькам, чтобы подняться к поверхности, и тем дольше время удержания пузырьков, что увеличивает удаление включений и солей [39].

В итоге, общими принципами оптимизации работы установки дегазации являются:

- Ввод инертного газа (аргона) для снижения водорода, натрия и кальция до необходимого уровня.

- Установка скорости продувочного устройства в целях сведения к минимуму турбулентность ванны и завихрение, в то же время максимизируя распределение пузырьков.

- Сохранение инертного свободного пространства для сведения к минимуму образования шлака и окисления графитового продувочного устройства.

### **Выводы**

В данной главе рассмотрены установки рафинирования металла фирмы «SNIF» и принципы работы этих установок. Описаны механизмы их работы, процессы удаления примесей, проходящие в алюминиевом расплаве при работе установок.

[Изъято 35 страниц]


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

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель магистерской  
программы д-р хим. наук,  
профессор

 Н.В. Белоусова

«07» 07 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

Разработка мероприятий по повышению качества плоских слитков серии 5xxx

Научный руководитель	<u></u> подпись, дата	К.Т.Н., доцент Должность, ученая степень	<u>Н.В. Баранов</u>
Выпускник	<u></u> подпись, дата		<u>И.С. Куликов</u>
Рецензент	<u></u> подпись, дата	Начальник отдела литья ЛЦ БРАЗ ООО «РУСАЛ ИТЦ» Должность, ученая степень	<u>А.В. Данилов</u>
Консультант экономического раздела	<u></u> подпись, дата	К.Э.Н., доцент Должность, ученая степень	<u>Т.В. Твердохлебowa</u>

Красноярск 2020