

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

«____» _____ 20__ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

«Разработка мероприятий по снижению содержания неметаллических
включений в первичных литейных сплавах»

Руководитель

Подпись дата

канд. техн. наук, доцент

Г.С. Саначева

Консультант по
экономической
части

Подпись дата

канд. экон. наук, доцент

Т.В. Твердохлебова

Магистрант

Подпись дата

П.А. Лекомцев

Рецензент

Подпись дата

Начальник ОЛ САЗ ЛЦ

ООО «РУСАЛ ИТЦ»

И.М. Венгринович

Красноярск 2020 год

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка мероприятий по снижению содержания неметаллических включений в первичных литейных сплавах» содержит 81 страницу текстового документа, 50 использованных источников литературы.

АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ, ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ, ФИЛЬТРАЦИЯ, РАФИНИРОВАНИЕ, ОЧИСТКА, ЧИСТОТА МЕТАЛЛА.

Объектом исследования является технология производства первичных литейных сплавов, выпускаемых на АО «РУСАЛ Саяногорск».

Целью данной работы является разработка мероприятий, направленных на снижение содержания неметаллических включений в первичных литейных сплавах.

В рамках магистерской диссертации необходимо выполнить:

1. Определить количество неметаллических включений в расплаве;
2. Анализ действующей технологии производства первичных литейных сплавов на предмет образования неметаллических включений на различных этапах передела;
3. Разработать мероприятия позволяющие снизить содержание неметаллических включений;
4. Выпустить опытные партии с целью подтверждения достигнутых результатов.

В результате выполнения работы был выполнен анализ существующих условий производства первичных литейных сплавов, требований потребителей к общему содержанию неметаллических включений в металле и оценка возможности выполнения данных требований. Разработаны мероприятия для достижения минимизации значений общего содержания включений в готовой продукции. Выполнено производство опытных партий. Вынесено предложение о внесении изменений в нормативную документацию.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	8
1 Литературный обзор.....	9
1.1 Алюминиевые литейные сплавы	9
1.2 Легирование и модифицирование алюминиевых сплавов	10
1.3 Неметаллические включения в литейных сплавах	12
1.4 Методы очистки расплава от включений.....	16
1.4.1 Внутрипечное рафинирование/флюсование.....	16
1.4.2 Внепечное рафинирование	22
1.4.3 Фильтрация.....	24
1.5 Этапы процессов приготовления расплава, оказывающих влияние на чистоту металла.....	28
1.5.1 Шихтовые и переплавляемые материалы	29
1.5.2 Температура.....	30
1.5.3 Удаление шлака с поверхности расплава	30
1.5.4 Отстой расплава в миксере	30
1.6 Методы определения концентрации включений применяемые на АО «РУ-САЛ Саяногорск».....	32
1.6.1 Анализатор чистоты металла Prefil-Footprinter	32
1.6.2 Определение содержания неметаллических включений в алюминиевом расплаве методом PoDFA.....	33
1.6.3 Анализатор чистоты расплавленного металла с непрерывным контролем LiMCA CM	35

2	Описание процесса производства литейных сплавов на АО «РУ-САЛ Саяногорск».....	37
3	Экспериментальная часть	40
3.1	Типовые требования потребителей к чистоте металла по рынкам сбыта ..	40
3.2	Оценка чистоты металла при производстве товарной продукции по действующей технологии производства.....	40
3.3	Статистический анализ данных чистоты металла за 2019г.....	50
4	Разработка мероприятий в промышленных условиях.....	52
4.1	Сравнение рафинирующей эффективности флюсовых препаратов применяемых на АО «РУСАЛ Саяногорск»	52
4.2	Производство партий по оптимальной технологии рафинирования расплава	60
5	Внедрение мероприятий в действующее производство	65
6	Экономическая эффективность проекта	66
7	Новые технологии в производстве литейных сплавов	69
7.1	Экономическое обоснование внедрения новой технологии	71
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	76

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие требования к качеству алюминия и его сплавов объясняются расширением областей применения и усложнением условий эксплуатации изделий из алюминия.

Материалы, применяемые в современных конструкциях, помимо высоких прочностных характеристик должны обладать комплексом таких свойств, как повышенная коррозионная стойкость, жаропрочность, теплопроводность и тугоплавкость, а так же способность сохранять эти свойства в условиях длительной работы под нагрузками.

Для облегчения изделий без потери прочностных характеристик применяются современные алюминиевые сплавы. Первичные литейные сплавы нашли широкое применение в автомобилестроении. Для данных сплавов важнейшими свойствами, определяющими их технологичность, являются жидкотекучесть, малая усадка, высокая плотность, а также низкая склонность к ликвации.

Достижение высокого качества слитков обеспечивается за счет:

- оптимального состояния оборудования (чистота рабочего пространства и миксера);
- применения качественных легирующих материалов;
- исключения вовлечения низкосортных отходов при переплаве;
- рафинирования расплава в процессе приготовления и непосредственно при литье, применения фильтрации;
- соблюдения регламентированных режимов модифицирования расплава в процессе литья.

Высокое качество металла определяется его структурой, и наличием примесей, химическим составом, а также содержанием водорода.

Все неметаллические включения, образующиеся в результате тех или иных реакций, имеющих место в процессе производства металла, обычно называют природными. Кроме природных включений в металле присутствуют так-

же частицы шлака, огнеупоров, материалов литейной формы, то есть те вещества, с которыми металл непосредственно соприкасается в ходе производства. Подобного рода неметаллические включения называют посторонними, или случайными.

Современный уровень технологии производства сплавов позволяет в значительной мере удалить из металла различные включения. Однако их общее содержание колеблется в широких пределах и значительно влияет на свойства металла. Больше или меньшее количество включений существует в любом сплаве в соответствии с его составом и условиями производства.

Неметаллические включения в сплавах являются инородными телами, нарушающими однородность его структуры, поэтому их влияние на механические и другие свойства может быть значительным. К примеру, при последующей эксплуатации готовых изделий неметаллические включения, играют роль концентраторов напряжения и могут вызвать образование трещины, являющейся очагом последующего усталостного разрушения данного изделия.

На основании вышеизложенного, снижение содержания неметаллических включений в первичных литейных сплавах является актуальной и востребованной темой.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является разработка мероприятий по снижению содержания неметаллических включений в первичных литейных сплавах, производимых в литейном отделении №2 АО «РУСАЛ Саяногорск».

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Литературный обзор, анализ теоретической части;
2. Обзор методологической части;
3. Анализ действующей технологии производства первичных литейных сплавов на предмет образования неметаллических включений на разных этапах передела;
4. Разработка мероприятий направленных на снижение содержания неметаллических включений;

5. Производство опытных партий по разработанным мероприятиям, анализ полученных результатов;

6. На основании полученных результатов, вынести предложение о применении разработанной технологии в действующем производстве.

Ожидаемый результат

Результатом научно – исследовательской работы будут являться разработанные технические и технологические решения, направленные на снижение содержания неметаллических включений в первичных литейных сплавах, выпускаемых на АО "РУСАЛ Саяногорск".

Практическая новизна работы

1. Повышение качества выпускаемой продукции, привлечение новых потенциальных потребителей, и как следствие расширение рынка сбыта.

2. Снижение риска получения потенциальных претензий от потребителей.

3. Разработанные технические решения не снижают производственные мощности по выпуску литейных сплавов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

СФУ	- сибирский федеральный университет;
АО	- акционерное общество;
НД	- нормативная документация;
МОМ	- машина обработки миксера;
RGI/RFI	- установка внутripечного рафинирования;
ACD	- устройство дегазации;
ЛА	- литейный агрегат;
ТС	- техническая спецификация;
НТД	- нормативно – техническая документация;
ФПР	- флюс покровно – рафинирующий;
RoDFA	- метод определения концентрации включений;
LME	- Лондонская биржа металлов;
PTF	- трубчатый металлофильтр;
PDBF	- насыпной металлофильтр;
TAC	- установка обработки металла в ковшах.

1 Литературный обзор

1.1 Алюминиевые литейные сплавы

Литейные сплавы – это сплавы, изделия из которых используют в недеформированном состоянии.

Литейные алюминиевые сплавы в расплавленном состоянии разливают непосредственно в их конечную форму одним из различных методов, таких как, литье в песчаные формы, литье в кокили или литье под давлением. При литье применяют сложные литейные формы. Эти сплавы часто имеют высокое содержание кремния для улучшения их литейных свойств.

Сплавы на основе алюминия занимают особое положение среди конструкционных материалов. С одной стороны, это связано с возможностью достижения уникального сочетания основных эксплуатационных свойств (прочности, пластичности, коррозионной стойкости и т. д.), с другой стороны, алюминий относится к наиболее распространенным в природе элементам, занимая по содержанию в земной коре третье место [1].

В автомобильной промышленности разных стран все шире применяются алюминиевые литейные сплавы [2]. Область использования этих сплавов может быть расширена за счет разработок, снижающих экологическую опасность технологических процессов и повышающих уровень их механических и технологических свойств [3].

Использование алюминиевых сплавов обусловлено их высокими физико-химическими и литейными свойствами, малым весом и прочностью, они имеют более высокие, чем сталь, теплопроводность, электропроводность и коррозионную стойкость [4]. Для литейных сплавов особенно важны такие характеристики как высокая жидкотекучесть, способность к заполнению литейной формы, малая склонность к образованию усадочных и газовых пустот, трещин, раковин и ликвации.

Важнейшие алюминиевые литейные сплавы содержат свыше 4,5 % кремния, так называемые силумины. Сплав алюминий с кремнием обеспечивает хо-

рошие литейные свойства (высокая жидкотекучесть, низкая усадка, малая склонность к трещинам и т.д.). Таким образом, наибольшее распространение в автомобилестроении получили следующие алюминиевые сплавы:

- AlSi7 (AK7) – сплав из алюминия и 7% содержания кремния. Этот сплав хорошо переносит термообработку и на 20% лучше выдерживает механические нагрузки, что делает его наиболее популярным.

- AlSi10/11 (AK12ч) – сплав из алюминия и 10/11% содержания кремния. По сравнению с AlSi7 имеет большую жидкотекучесть, но хуже поддается термической обработке и менее устойчив к нагрузкам и механическому сопротивлению в целом [5].

Помимо кремния, в зависимости от требований, предъявляемых к данным сплавам, в их состав так же вводятся дополнительные легирующие элементы, такие как: Ti, Mg, Sr, Cu, Mn и т.д. Упрочнение сплавов происходит в результате упрочнения основного твердого раствора [6].

1.2 Легирование и модифицирование алюминиевых сплавов

Прочность и другие механические свойства алюминиевых сплавов, как деформированных, так и литейных, определяются в основном их химическим составом, то есть содержанием в алюминии легирующих элементов, а также вредных примесей. В результате этого сплав изменяет, свои первоначальные механические свойства и получает свое окончательное состояние, в котором и поставляется заказчику.

Лигатурой называют промежуточный сплав, добавляемый в расплав для получения требуемого химического состава, структурных и технологических свойств отливок и слитков. Легированием же называют процесс ввода лигатуры в основной (жидкий) металл, и дальнейшее их сплавление.

Применение лигатур необходимо из-за малой скорости растворения тугоплавких компонентов в чистом виде в жидком алюминии, а также из-за повышения степени усвоения легкоокисляющихся легирующих элементов. Важным свойством лигатуры считается значительно более низкая температура плавления

ния, чем у тугоплавкого компонента. Применение лигатур с легкоплавкими элементами позволяет снизить потери последних на испарение и окисление [7].

Лигатуры обычно изготавливаются с использованием специального флюса, который ускоряет смешивание легирующей добавки с расплавом и используется для преодоления проблемы эффективного перемешивания.

Обычно в литейном цехе используются предварительно приготовленные лигатуры, которые загружаются непосредственно в плавильную или раздаточную печь, где перемешиваются с помощью скребков, МГД – перемешивателей и других установок. Загрузка легирующих компонентов осуществляется предварительно, так как требуется продолжительное время для полного смешивания легирующей добавки с расплавом, помимо этого скорость растворения зависит от типа применяемого инструмента для вымешивания лигатуры в расплаве.

Наиболее распространены в качестве легирующих элементов для легирования алюминиевых сплавов следующие элементы: медь, магний, марганец, кремний, железо, стронций.

Железо является практически нерастворимым в алюминии элементом, при ничтожно малых его содержаниях в структуре алюминия появляется эвтектика $Al + Al_3 Fe$. Соединение $Al_3 Fe$ выделяется в виде игл, играющих роль надрезов в металле, снижающих пластические свойства алюминия. Следует отметить и то, что железо снижает коррозионную стойкость алюминия и поднимает линию солидуса в алюминиевых сплавах до $655\text{ }^{\circ}C$ [8].

При легировании кремнием, он не вступает с алюминием в химическую реакцию и присутствует в алюминиевых сплавах в виде вторичного твердого раствора. Однако, по своим физическим свойствам кремний близок к химическим соединениям, обладает высокой твердостью и хрупкостью. Растворяясь в алюминии кремний, незначительно снижает его пластические свойства, но несколько упрочняет сплав. Из-за дендритной ликвации, проявляющейся в условиях реальной кристаллизации, даже небольшие количества свободного кремния вызывают появление эвтектики $Al-Si$, то есть температура солидуса будет составлять $577\text{ }^{\circ}C$, а ликвидуса $\sim 600\text{ }^{\circ}C$ [9].

Магний и медь оказывают положительное влияние на прочностные характеристики алюминия [10]. Они образуют упрочняющие фазы с алюминием, поэтому медь является одним из главных легирующих элементов, определяющим природу сплавов. Медь оказывает положительное влияние на жаропрочность алюминиевых сплавов.

Для повышения прочностных свойств одного легирования недостаточно, так как легирующие элементы изменяют химический состав сплава, но не предоставляют возможности контролировать структурные составляющие. Для достижения этой цели применяют модифицирование [11].

Модифицирование подразумевает под собой ввод малых количеств веществ (модификаторов) в расплав с целью измельчения зерна и улучшения механических свойств. Силумины модифицируют прутковыми лигатурами AlTi5B1 и AlSr10/20.

Лигатуру системы Al-Ti-B вводят в расплав в потоке жидкого металла с применением специальных установок с целью измельчения зерна сплава. Процесс измельчения зерна происходит за счет тугоплавких частиц Al₃Ti и TiB₂, которые присутствуют в лигатуре и служат дополнительными центрами кристаллизации [12].

Прутковую лигатуру AlSr вводят в расплав с целью изменения структуры эвтектики. Алюминиевая основа лигатуры полностью растворяется, а легирующий металл Sr взаимодействует, с присутствующим в расплаве Si, таким образом, изменяется форма эвтектики из иглообразной в сферическую [13].

В комплексе, такое модифицирование позволяет изменить структуру сплава, и способствует повышению эксплуатационных и прочностных характеристик алюминиевых сплавов [14].

1.3 Неметаллические включения в литейных сплавах

По причине высокой химической активности алюминия и легирующих элементов технология литья не обеспечивает получения чистых заготовок. В заготовках в том или ином количестве всегда присутствуют неметаллические

включения. Степень загрязнения определяется чистотой и условиями хранения исходных шихтовых материалов, а так же уровнем совершенства технологического процесса и культурой производства.

Неметаллические включения это соединения металлов с неметаллами. Они представляют собой твёрдые частицы, присутствующие в алюминии при температуре выше ликвидуса. Количество и размеры этих частиц зависит от многих факторов, в частности, от исходного качества Al – сырца, легирующих материалов, чистоты рабочего пространства миксера и соблюдения культуры производства в целом [15].

Типичными включениями в алюминии являются окисные плёны, шпинели, остатки модификатора, карбиды, соли и бориды, то есть те включения, которые образуются в процессе тех или иных реакций. В металле так же могут присутствовать так называемые посторонние (случайные) включения – это частицы шлака, огнеупоров, материалов литейной формы то есть те вещества, с которыми металл непосредственно соприкасается в ходе производства. Источники включений представлены в таблице 1.

Таблица 1- Источники включений

Тип	Основные источники
Оксиды (Al_2O_3 , плёнки)	Реакция алюминия с кислородом, поверхностная турбулентность, загрязнение шихтовых материалов, низкая культура производства
MgO , $MgAl_2O_4$ кубоиды, шпинели, кристаллы шпинели)	Разрушение огнеупоров, сплавы с высоким содержанием Mg
SiO_2 , FeO	Разрушение огнеупоров, технологические инструменты/ржавчина/пыль в воздухе
Карбиды (Al_4C_3 , графит)	Металл корпуса электролиза, разрушение графитовых деталей (роторов/флюсовых трубок)
Бориды (TiB_2 , $TiVB_2$, AlB_2/AlB_{12})	Добавление добавки, измельчающей зерно/переработка лома, осаждение Ti/V во время обработки бором электропроводящих сплавов
Костяная зола	Защита желобов/инструментов, чрезмерное использование
Хлориды	Продукт реакции во время флюсования (в основном поточное флюсование)

Исходя из вышесказанного, неметаллические включения можно разделить на два вида:

Эндогенные включения в алюминии образуются в ходе химических реакций «на месте» - в самом алюминиевом расплаве. Примером является реакция растворенного кислорода в жидком алюминии с образованием оксида алюминия:



В сплавах, содержащих магний, образуется оксид магния (магнезия) и шпинель (рис.1):

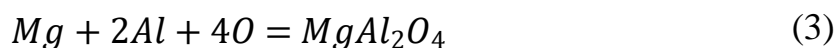


Рисунок 1 - Шпинель ($MgAl_2O_4$)

При модифицировании расплава прутковой лигатурой Al-Ti-B чистота расплава ухудшается по причине образования диборидов титана (TiB_2) (рис.2). Поэтому в процессе модифицирования расплава необходимо строго придерживаться технологических требований по объему вводимой в расплав лигатуры. Как показывают исследования, оптимальный объем вводимой лигатуры составляет 0,3 кг/тн.

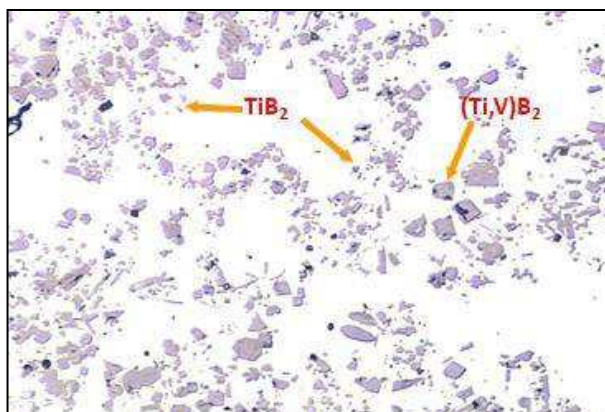


Рисунок 2 - Диборид титана (TiB_2)

Особую проблему представляют собой карбиды алюминия (Al_4C_3) (рис.3), образующиеся в процессе производства Al-сырца в электролизном производстве. В частных случаях объем содержания включений данного вида может превышать 50% от общего содержания включений.

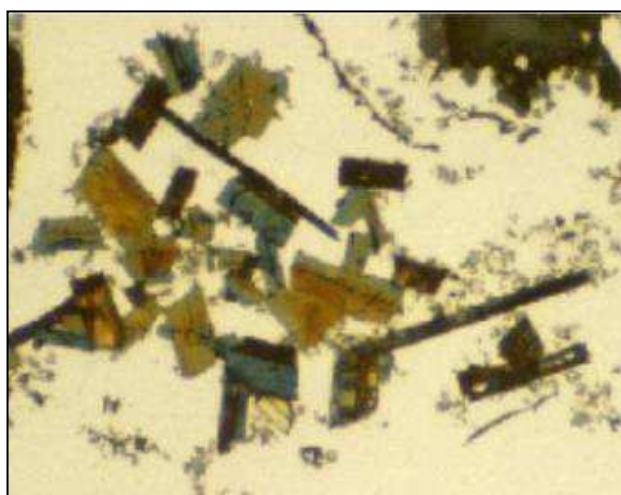


Рисунок 3 - Карбид алюминия (Al_4C_3)

Экзогенные включения в алюминии, это частицы, которые существовали как отдельная фаза до вовлечения Al-сырца и расплавления шихты в миксере. Примером экзогенных включений являются малые кусочки футеровки (рис.4), которые попадают в расплав. Другим примером могут быть частицы оксидов (рис.5) или загрязнений, которые были на легирующих материалах или шихте из алюминиевого лома.

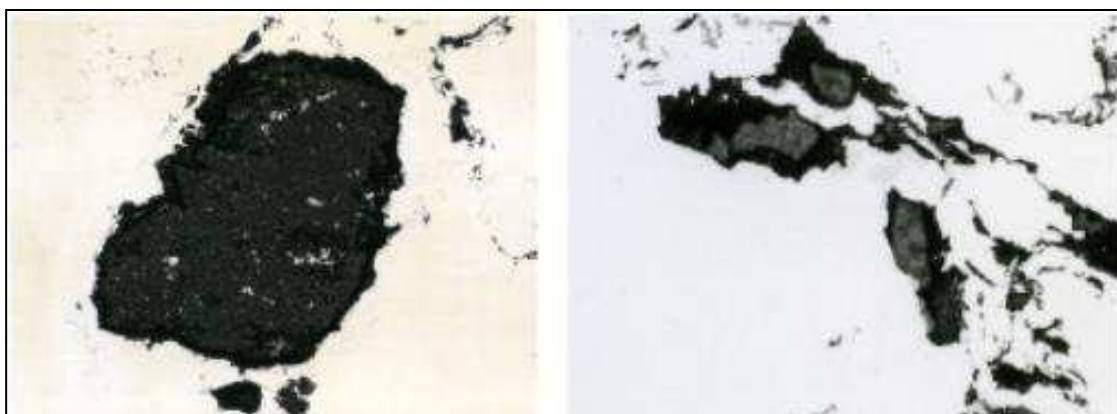


Рисунок 4 - Частицы огнеупорных материалов

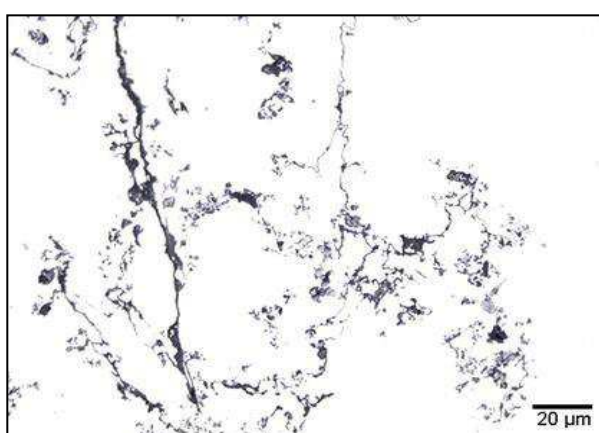


Рисунок 5 - Оксидные плёнки

Экзогенные включения почти полностью являются оксидами и имеют более значительные размеры, чем эндогенные включения. Поэтому их присутствие в алюминии считается более вредным. Большие размеры экзогенных включений позволяют более легко извлекать их из расплава [16].

1.4 Методы очистки расплава от включений

1.4.1 Внутрипечное рафинирование/флюсование

Флюсование металла — это первый этап очистки металла, который выполняется в плавильной печи или в миксере. Этот процесс обеспечивает предварительную обработку металла, удаляя из него газы, окислы и прочие инородные включения [9].

Флюсы смачивают неметаллические включения, при этом происходит увеличение их размеров. Включения осаждаются или всплывают с большей скоростью. В результате диссоциации составляющих флюса, которые способствуют флотированию действию, часть включений удаляется пузырьками пара.

Флюсование может осуществляться за счет газообразных или твердых флюсов.

Основная цель заключается в удалении щелочных и прочих включений либо за счет использования твердого флюса – хлорида калия/магния, либо за счет газообразного хлора с использованием азота в качестве несущего газа в плавильной/раздаточной печи [17].

В зависимости от типа флюса, флюс замешивают в расплав или рассыпают на поверхность расплава в миксере с применением специальных насадок на машину обработки миксеров или дизельный погрузчик или с применением специальных стационарных или мобильных установок RFI или RGI (рис. 6).



Рисунок 6 – Установка RFI

Флюс замешивается в расплав. Перемешивание ведут до прекращения взаимодействия между металлом и флюсом. После выдержки в течение 10-30 минут (в зависимости от технологической схемы), которая необходима для всплывания (осаждения) капель флюса, шлак удаляют с поверхности расплава [18].

Необходимое условие применения флюсов – тщательная их просушка или переплавка с целью удаления адсорбированной и кристаллизационной влаги (требования входного контроля допускают наличие влаги до 1,5%).

Флюсы в твердом состоянии, в виде порошка, хлопьев или гранул, обычно состоят из хлористых и фтористых солей с дополнительными добавками для придания им специальных свойств.

Флюсы могут быть разделены на несколько групп (Рис. 7). Флюсы для снижения содержания металла в шлаке и для очистки от неметаллических включений имеют схожий состав, поскольку эти процессы проходят, как правило, вместе.

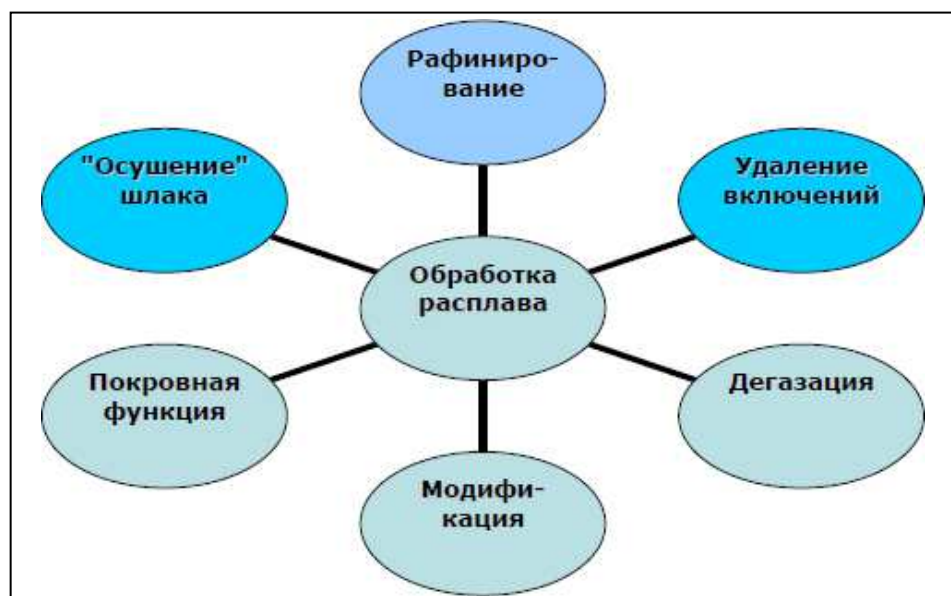


Рисунок 7 – Общая классификация флюсов

Большинство флюсов основаны на смеси солей KCl и $NaCl$, которые образуют низкотемпературную эвтектику. Другим частым ингредиентом флюсов является фторид натрия NaF , который образует тройную эвтектику с KCl и

NaCl с точкой плавления 607 °С. Обычный покровный флюс содержит около 47,5 % NaCl, 47,5 % KCl и 5 % фтористой соли. Низкая температура плавления является важной, так это повышает текучесть флюса.

Доступные на рынке покровные, модифицирующие и дегазирующие флюсы могут иметь дополнительные функции по удалению включений, либо снижению содержания металла в шлаке, либо обе этих функции [19].

Фтористые соли щелочных металлов действуют как поверхностно-активные вещества, снижающие поверхностное натяжение между флюсом и металлом, с одной стороны, и флюсом и оксидами, с другой. Хлористые соли проявляют это свойство в меньшей степени.

Фтористые соли щелочных металлов имеют способность растворять оксиды (хотя и в очень малой степени), что облегчает им проникновение в оксидные пленки в шлаке и наростах на стенках миксера. Это приводит к улучшению смачиваемости, что способствует отделению оксидных включений от расплава и металлических включений от шлака.

Добавки нитратов, таких как KNO_3 , приводит к выделению тепла. Эти флюсы являются экзотермическими. Выделившийся в результате разложения нитратов кислород реагирует с металлическим алюминием с образованием Al_2O_3 и значительным количеством тепла. Это локально увеличивает текучесть, способствуя отделению металла от оксидов. Для флюсов, которые применяются для чистки печей, эта реакция повышает проникновение флюса в наросты на стенке печи.

Оксиды могут удаляться из алюминиевого расплава путем его обработки флюсами. Флюсы на основе фторидов способны связывать оксиды. Межповерхностное натяжение между оксидом и металлом значительно выше, чем межповерхностное натяжение, которое возникает между оксидом и фторидом. Затем фториды и оксиды образуют смешанные фазы, так как в результате своего более низкого энергетического состояния фториды «прилипают» к оксидам и покрывают их, а алюминий отделяется от этих смешанных фаз [20].

На рисунке 8 схематически показан процесс очистки алюминиевого расплава флюсами. Флюс, содержащий фториды, вводится в расплав и хорошо перемешивается в нем. Флюс обволакивает оксиды и затем фториды образуют с оксидами смешанные фазы. Это приводит к распаду оксидов на отдельные куски. Эти обломки оксидов со смешанными фазами имеют возможность всплывать, так их плотность существенно ниже, чем плотность алюминиевого расплава. В результате этого образуется шлак с низким содержанием металла. Заметим, что плотность чистых оксидов почти равна плотности расплава и поэтому они практически не имеют возможности всплывать [21].

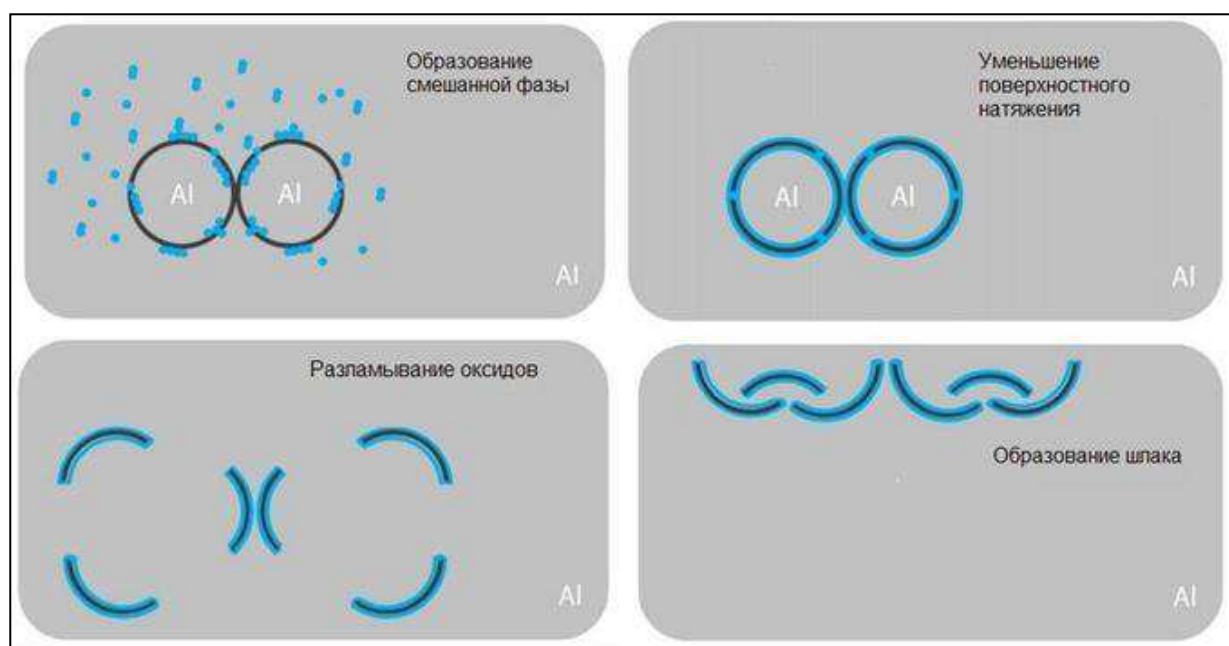


Рисунок 8 - Принцип очистки алюминиевого расплава от оксидов при обработке флюсом, содержащим фториды

Процесс очистки алюминиевого расплава флюсами может комбинироваться с роторной газовой продувкой. При такой обработке гарантируется оптимальная дегазация, удаление оксидов и получение шлака с низким содержанием алюминия (рис.9) [22].

Мобильные и стационарные системы рафинирования расплава используют инертный газ (Ar, N) или/и активный газ (Cl) и рафинирующие и/или покровные флюсы [23]. Современные системы позволяют одновременно произво-

дить как очистку металла от водорода, щелочных металлов, неметаллических включений, так и перемешивание металла при минимуме шлакообразования.

При обработке расплава в печи с роторной продувкой чаще всего используются установки RGI и RFI.

Установка RGI позволяет подавать в расплав флюс совместно с такими инертными газами как аргон и азот. Установка RFI помимо ранее перечисленных составляющих, так же позволяет подавать в расплав хлор - газ окислитель.

В совокупности данные компоненты позволяют в максимальной степени очистить расплав от водорода, окислов и других неметаллических включений [24].

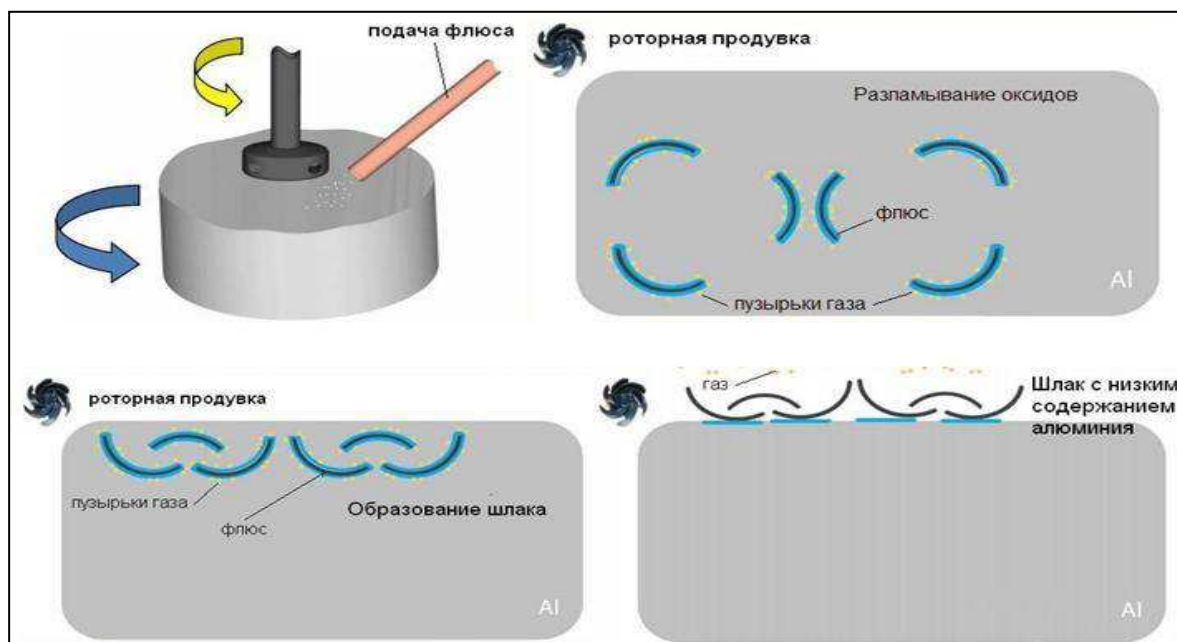


Рисунок 9 - Обработка алюминиевого расплава флюсом совместно с роторной продувкой (дегазацией)

Без подачи флюса такая роторная обработка не столь эффективна для удаления оксидов и, кроме того, приводит к образованию шлака с высоким содержанием алюминия [25].

Шлак, который образуется на расплаве при его обработке без применения флюсов, имеет высокое содержание алюминия, обычно от 80 до 95 %. Шлак, который получен после обработки расплава флюсами, является менее плотным и имеет содержание алюминия от 15 до 35 % [26].

1.4.2 Внепечное рафинирование

Присутствие неметаллических включений негативно сказывается на качестве заготовки, что приводит к снижению прочностных характеристик, а также к неконтролируемости литейных процессов [27].

Для удаления всех нежелательных примесей на производстве используют множество методов, в частности одним из методов очистки расплава от неметаллических включений является продувка расплава инертными газами, которая осуществляется при реализации двух процессов:

- удаление водорода путем диффузии его в пузырьки инертного газа;
- удаление неметаллических включений за счет адсорбирующего действия на них пузырьков продуваемого газа [28].

Данный метод позволяет очищать жидкий металл от водорода и неметаллических включений в потоке расплава.

Для этой цели используются специальные дегазационные установки, которые устанавливаются в систему металлотракттов.

При прохождении через расплав сравнительно крупных пузырьков продуваемого газа, мельчайшие пузырьки молекулярного водорода адсорбируются на их поверхности и удаляются в атмосферу. Одновременно удаляются и неметаллические включения, в том числе и те, которые образуют с водородом устойчивые комплексы. Для получения максимального эффекта очистки расплава от неметаллических включений и газа необходимо, чтобы пузырьки продуваемого газа имели минимальные размеры, равномерно проходили через расплав и медленно поднимались на поверхность [29].

На примере установки ACD STAS (рис.10) - специальный ротор доставляет аргон в жидкий металл, для наилучшего взаимодействия инертного газа с водородом и неметаллическими включениями ротор вращается и разбивает пузырьки инертного газа на наиболее мелкие [30]. Когда диаметр газовых пузырьков уменьшается от 15 до 5 мм, число пузырьков возрастает с коэффициентом 27 и диффузионный слой — с коэффициентом 4. Площадь поверхности

увеличивается с коэффициентом 9, и способность удалять меньшие частицы увеличивается с коэффициентом 3. Флотационный поток должен быть вертикальным и без турбулентности. Далее по мере всплывания на поверхность, пузырек газа – очистителя, насыщается растворенным в металле водородом и неметаллическими включениями и всплывает на поверхность.

Неметаллические включения удаляются флотацией к поверхности расплава. Эффективность флотации лимитирована размером и количеством газовых пузырьков.

Аргон является одним из наиболее распространенных инертных газов в производстве литейных сплавов. Данный газ не взрывоопасен, нетоксичен и имеет сравнительно не высокую стоимость и производится в промышленных масштабах.



Рисунок 10 – Дегазационная установка ACD STAS

Роторы, изготовленные из графита, это открытые трубки с малым внутренним диаметром, работающие с высоким давлением газа. При этом в расплав входит тонкая струя газа, которая делится на множество отдельных мелких пузырьков [31]. Выходящий в расплав газ под действием вращения делится или разбивается на пузырьки (рис.11).

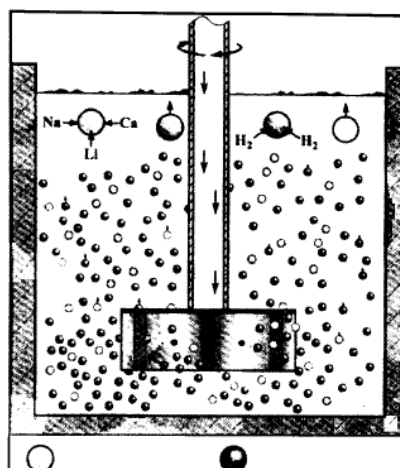


Рисунок 11 – Схема газовой флотации

На поверхности ванны дегазатора газ – очиститель и газ, перешедший в него из расплава, удаляются в атмосферу. По мере вовлечения в процесс продувки новых порций газа будет происходить освобождение жидкого сплава от растворенных газов и неметаллических включений.

Такая процедура повышает качество приготовленного расплава, чем значительно повышает качество отливок [32].

Особенности свойств и поведения неметаллических примесей в алюминиевых расплавах обуславливают разницу в механизмах удаления из расплава водорода и оксидов при дегазации. Вместе с тем с повышением эффективности удаления из расплава водорода будет происходить и лучшая очистка расплава от твердых неметаллических включений. Проявляемая при этом синхронность в удалении указанных примесей является скорее не свидетельством их взаимосвязи, а результатом параллельно протекающих самостоятельных процессов [33].

1.4.3 Фильтрация

В процессе фильтрации включения отделяются от расплава фильтрующей средой тремя различными способами (в зависимости от размеров включений и размеров ячеек фильтрующей среды):

- на поверхности фильтрующей среды происходит просеивание, в результате чего на поверхности фильтра остаются включения, которые больше размеров отверстий фильтрующей среды (рис.12);



Рисунок 12 – Оседание включений на поверхности фильтра

- величина диаметра включений того же размера, что и размер отверстий фильтрующей среды, соответственно, включения задерживаются внутри фильтрующей среды;

- величина диаметра включений меньше размера отверстий фильтрующей среды, тем самым частицы могут быть задержаны на внутренней поверхности каждой поры (рис.13). Имеется определенный ряд причин, по который включения минимальных размеров задерживаются на внутренней поверхности пор:

1. Гравитационные силы;
2. Инерционные силы (действуют на частицы значительного веса, которые при изменениях траектории ударяются о внутреннюю поверхность пор фильтра;
3. Гидродинамические воздействия (происходят вследствие различия скоростей в ячейках фильтра, в зависимости от размеров и формы частицы она вращается и перемещается в потоке фильтруемого расплава) [34].

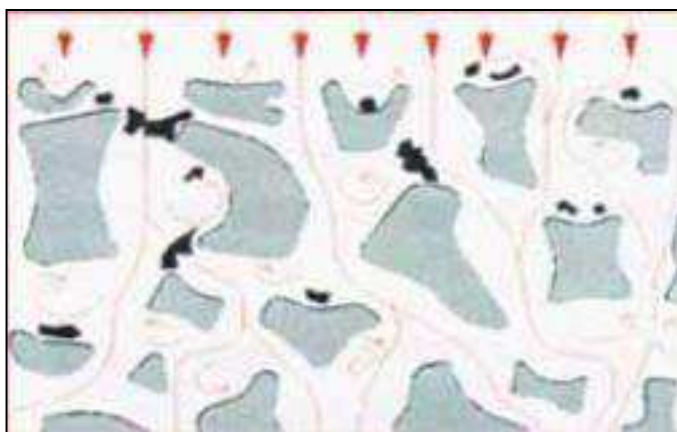


Рисунок 13 – Фильтрация внутри фильтра

Включения, которые вошли во взаимодействие с внутренней средой фильтровальной поверхности, удерживаются на ней под действием сил Ван-дер-Ваальса. Частицы могут быть удалены с поверхности путем физического воздействия на фильтровальную среду, внезапным увеличением скорости потока.

Для очистки расплава от неметаллических включений используют такие виды фильтров как: фильтры из стеклосетки, из пенокерамики, керамические трубчатые и насыпные.

Фильтрация расплава через пенокерамические фильтры является очень эффективным способом для удаления неметаллических включений. Фильтр представляет собой пластину из керамической пены толщиной 50-75 мм, которые монтируются в фильтр – бокс, расположенный в системе лотков между миксером и станцией разливки. Перед разливкой фильтр прогревают до рабочей температуры, после разливки определенного количества металла, фильтр утилизируют и устанавливают новый. В процессе изучения процессов фильтрации было доказано, что предварительный разогрев фильтра увеличивает срок его службы.

Пенокерамические фильтры характеризуются большим количеством связанных каналов, распределенных по всему объему фильтра. Жидкому металлу приходится «искать дорогу» через эти каналы, что увеличивает возможность контакта включений с фильтровальной средой. В процессе адсорбции между включениями и поверхностью фильтра образуется нарост, который действует

как очень мелкая фильтровальная ткань. Образование такого нароста служит определяющим фактором, так или иначе способствующим высокой эффективности работы фильтрующей среды.

Пенокерамические фильтры изготавливают различного качества, 20-80 ppi, размеры пор зависят от количества пор на дюйм (pores per inch). Чем меньше поры, тем наиболее мелкие включения способен улавливать фильтр.

В настоящее время успешно практикуется двухступенчатая фильтрация с использованием пенокерамических фильтров разной пористости, что способствует наилучшему очищению расплава от неметаллических включений [35].

Не менее эффективный способ фильтрации, фильтрация через пористые керамические трубки вмонтированные в камеру (PTF). Трубки изготавливают различной степени пористости. Принцип фильтрации заключается в прохождении металла внутрь трубок через их стенки. При использовании данного вида фильтрации требуется высокое металлостатическое давление, поскольку керамические трубки оказывают высокое противодействие потоку металла. Чаще всего данный метод применяют при изготовлении фольги.

Насыпные фильтры (PDBF) из-за трудоемкого процесса подготовки пользуются наименьшей популярностью, чем другие. Фильтр состоит из двух слоев шариков оксида алюминия или слоя гранулята нефтяного кокса, на котором лежит слой шариков оксида алюминия. Данный материал рассыпается равномерным слоем на поверхность сетчатой пластины, до образования ровной по толщине фильтрующей подушки (рис. 15).

Во время движения металла по каналам между компонентами фильтра, удаление включений происходит за счет их отложения на внутренней поверхности фильтрующей среды. Такая фильтрация наиболее эффективна для удаления небольших включений и если содержание включений в расплаве незначительно.

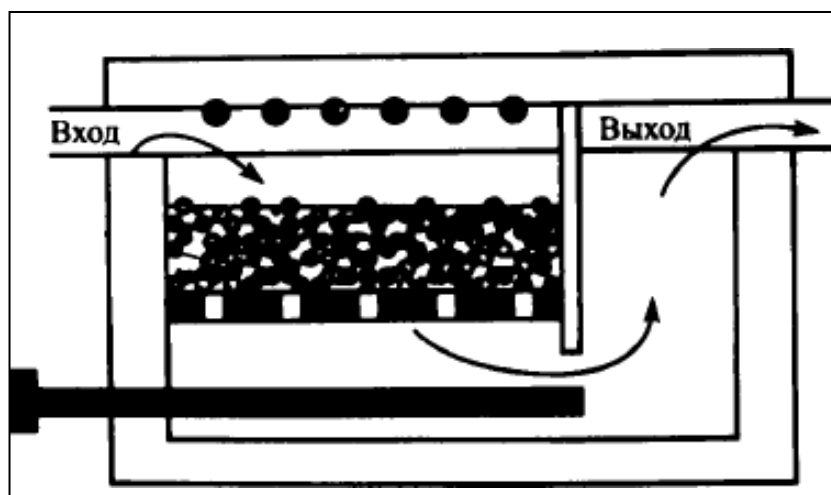


Рисунок 15 – Схема насыпного фильтра.

Данная система имеет наибольший ресурс возможности фильтрации относительно объемов металла, нежели другие виды фильтрующих систем, но недостатком данной фильтрующей системы является относительно большой слив металла из фильтра при переходе на другие виды сплавов.

1.5 Этапы процессов приготовления расплава, оказывающих влияние на чистоту металла

Чистота металла это важный аспект качества слитков, требования которого варьируются в соответствии с требованиями к конечному продукту.

Зачастую рафинирование и фильтрация расплава рассматривается как единственные варианты улучшения характеристики – чистота металла. На сегодняшний день рафинирование и фильтрация расплава позволяет удалить лишь определенный процент включений. Таким образом, чистота металла поступающего в фильтр, имеет решающее значение для качества выпускаемой продукции [36].

Далее, будет изложен обзор и примеры того, как различные этапы процесса литья влияют на чистоту расплава (рис.16).

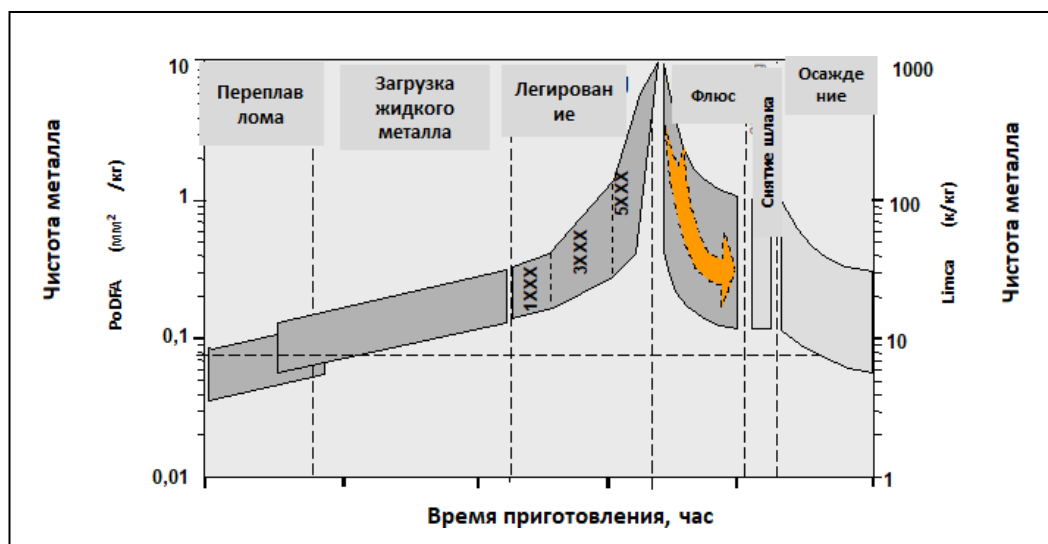


Рисунок 16 - Источники включений в технологической цепочке приготовления расплава

1.5.1 Шихтовые и переплавляемые материалы

Вовлекаемые при производстве сплавов материалы, выбираются в зависимости от необходимости достижения определенного химического состава и необходимости произвести продукт с минимальными затратами. При этом, как показывает практика, производство не имеет информации о параметрах чистоты материалов вовлекаемых в печь.

Недавнее исследование по оценке воздействия шихтовых материалов на чистоту металла, показало, что партии выпущенной продукции, произведенные на основе материалов с наихудшим качеством (вовлечение низкосортных технологических отходов), имеют показатели чистоты металла вдвое хуже, чем партии, произведенные из высококачественных материалов [37].

Так же в соответствии с теоретической моделью, существует вероятность, что более габаритные материалы, вовлекаемые в печь, в процессе плавления будут больше поддаваться окислению, что в конечном итоге приведет к увеличению концентрации неметаллических включений в расплаве [38].

1.5.2 Температура

Температура во время приготовления расплава и литья имеет решающее значение для минимизации окисления шихтовых материалов, особенно в сплавах, имеющих в своем составе Mg и Sr. Для сплавов с содержанием Mg и Sr, окисление быстро ускоряется после инкубационного периода, который становится короче с ростом температуры [39]. Поэтому стоит избегать длительного выдерживания расплава и температуры выше 750 °С.

Эти меры часто предназначены для ограничения окисления и потерь расплава, что в свою очередь способно оказать значительное влияние на чистоту металла.

1.5.3 Удаление шлака с поверхности расплава

Правильно организованная методика удаления шлака с поверхности расплава не позволяет удалить все неметаллические включения из расплава. Но как показывают исследования, более качественная обработка поверхности расплава позволяет в значительной мере улучшить показатели чистоты металла, так как в данном случае будет исключена возможность оседания нежелательных включений и дальнейшее их попадание в выпускаемую продукцию. Именно поэтому данной процедуре следует уделять особое внимание [40].

1.5.4 Отстой расплава в миксере

Большинство неметаллических включений имеют плотность больше, чем расплавленный алюминий, поэтому они будут оседать в придонную область миксера. Это явление было подтверждено результатами анализов полученных методом PoDFA. Оценка чистоты расплава производилась от разных плавков с изменением времени отстаивания расплава в миксере.

Скорость оседания неметаллических включений рассчитывается по закону Стокса:

$$V_s = gD_p^2(p_p - p_1)/18\mu \quad (4)$$

где V_s - скорость оседания, g - гравитационная постоянная, D_p - диаметр частицы, ρ_p - плотность частицы, ρ_l - плотность жидкости, μ - вязкость жидкости.

Закон Стокса подразумевает, то что, если частицы падают в вязкой жидкости под действием собственного веса, то установившаяся скорость достигается, когда сила трения совместно с силой Архимеда точно уравновешиваются с силой гравитации.

Расчет предсказывает, что все относительно тяжелые частицы размером 20 мкм достигнут дна печи в течение часа, в то время как наблюдаемое поведение указывает на то, что некоторые частицы в этом диапазоне размеров остаются взвешенными после выдержки в течение четырех часов. Отклонения от закона Стокса обычно объясняется естественной конвекцией печи и несферической формой частиц [41].

Данные PoDFA показали, что более 90% частиц размером более 40 мкм оседали через 15 минут времени отстоя расплава (рис.22), в то время как только около половины частиц в диапазоне размеров 20–25 мкм оседали за это же время [9]. Тридцать минут времени отстоя расплава могут удалить 80% частиц размером 20–25 мкм. Важно отметить, что эти частицы могут быть легко ре-суспензированы путем перемешивания или рафинирования расплава флюсами.

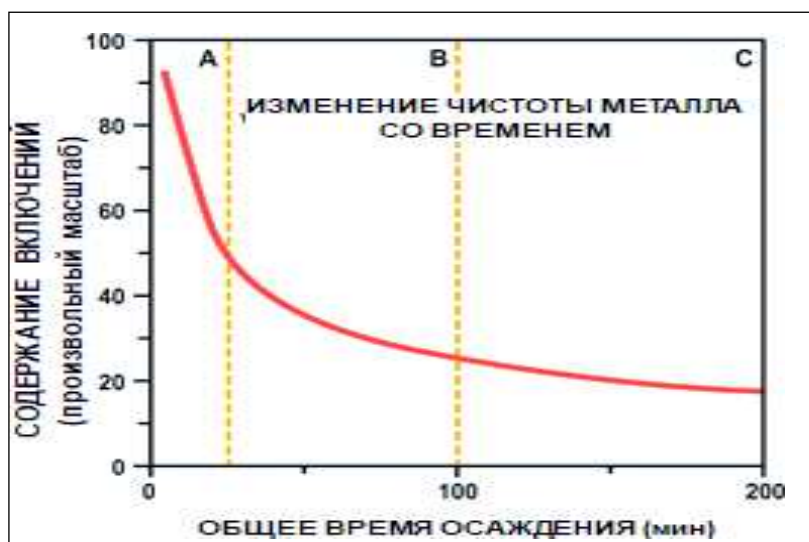


Рисунок 17 - Изменение чистоты металла со временем отстоя

[Изъято 49 страниц]

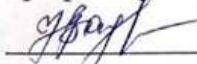
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель магистерской
программы д-р хим. наук,
профессор

 Н.В. Белоусова
« 10 » 07 20 20.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

«Разработка мероприятий по снижению содержания неметаллических
включений в первичных литейных сплавах»

Руководитель

 24.06.20
Подпись дата


канд. техн. наук, доцент
Г.С. Саначева

Консультант по
экономической
части

 07.07.2020
Подпись дата

канд. экон. наук, доцент
Т.В. Твердохлебowa

Магистрант

 24.06.2020
Подпись дата

П.А. Лекомцев

Рецензент

 24.06.2020
Подпись дата

Начальник ОЛ САЗ ЛЦ
ООО «РУСАЛ ИТЦ»
И.М. Венгринович

Красноярск 2020 год