

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

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель магистерской
Программы

_____ Н.В. Белоусова
подпись инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20 ____ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Совершенствование технологии заливки чугуном

катодных подовых секций

тема

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

код и наименование магистерской программы

Руководитель:

канд.техн.наук, доцент
каф. МЦМ ИЦМиМ
А.С. Ясинский
инициалы, фамилия

подпись, дата

Консультант:

канд.эконом.наук, доцент
каф. МЦМ ИЦМиМ
Т.В. Твердохлебова
инициалы, фамилия

подпись, дата

Студент:

ЦМ 18-29 М, 061837004
номер группы, зачетной книжки

подпись, дата

В.С. Аптикеев
инициалы, фамилия

Рецензент:

Менеджер ОП ООО ИТЦ

подпись, дата

А.И. Лихомысля
инициалы, фамилия

Красноярск 2020

**«СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЛИВКИ ЧУГУНОМ
КАТОДНЫХ ПОДОВЫХ СЕКЦИЙ»**

Актуальность проблемы. Критическим вопросом алюминиевой отрасли был и остается вопрос стойкости алюминиевых электролизеров и высокая энергоемкость процесса электролиза. С точки зрения электрического баланса электролизера наиболее предпочтительным способом заделки контакта «подовый блок – катодный стержень» является заливка расплавом чугуна. Термические напряжения, вызванные высоким градиентом температур между блоком, подовым блоком и расплавом чугуна могут привести к образованию трещин, деформации блоков и снижению срока службы электролизера. Для исключения возникновения высоких термических напряжений необходим предварительный нагрев блоков и подовых блоков. Использование синтетического чугуна взамен литейного снижает себестоимость выплавки чугуна и повышает его структурную однородность, что делает предпочтительным внедрение синтетического чугуна для заливки катодных стержней при сборе катодных секций.

Цель работы: разработка технологических и технических решений, обеспечивающих снижение расхода электроэнергии на 150 кВтч/т Al и увеличение срока службы электролизера путем повышения качества контакта «подовый блок – катодный стержень» с применением заливки из синтетического чугуна.

Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

1. Анализ влияния технологических параметров электролиза на стойкость катодных подовых секций.
2. Определение оптимальных параметров предварительного нагрева блоков и подовых блоков, исключающих последствия термоудара в процессе заливки чугуном катодных подовых секций.
3. Определение условий получения высококачественного чугуна с мелкозернистой однородной структурой. Изучение особенностей технологии производства синтетического чугуна при применении установки индукционного нагрева.
4. Улучшение существующего технологического процесса монтажа путем введения предварительного нагрева катодных стержней и блоков с использованием синтетического чугуна в качестве заливки подовых секций;
5. Исследования динамики падения напряжения в подине и напряжения в электролизере в процессе эксплуатации;
6. Определение технико-экономической эффективности используемых технологических решений;

Делая выводы о практической применимости диссертационного исследования, можно утверждать, что полученные результаты могут быть использованы на всех предприятиях производства алюминия электролитическим способом.

Ключевые слова: заделка контакта «подовый блок – катодный стержень», повышение стойкости алюминиевых электролизеров, заливка расплавом синтетического чугуна.

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АЛЮМИНИЕВЫЙ ЭЛЕКТРОЛИЗЕР: КОНСТРУКЦИЯ И ПРИЧИНЫ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ. ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА ДЛЯ ЗАЛИВКИ КАТОДНЫХ СТЕРЖНЕЙ.....	10
1.1 Теоретические основы получения алюминия.....	10
1.2 Эволюция конструкции анодов.....	13
1.3. Эволюция катодного устройства электролизера.....	15
1.3.1 Основные типы кожухов катодных устройств.....	16
1.3.2 Конструкция подины.....	18
1.3.3 Материалы катодных блоков.....	21
1.3.4 Бортовые блоки.....	22
1.3.5 Структура цоколя катодного устройства.....	22
1.4 Ошиновка.....	23
1.5 Причины снижения срока службы электролизера.....	25
1.5.1 Диффузионное внедрение натрия.....	26
1.5.2 Монтаж катодных стержней.....	29
1.6 Технология получения высококачественного серого чугуна.....	33
1.6.1 Влияние легирующих добавок на структуру и свойства чугуна.....	34
1.6.2 Вредные примеси и дефекты в структуре чугуна.....	35
1.6.3 Технология модифицирования.....	37
1.6.4 Особенности выплавки чугуна в индукционной электропечи.....	38
1.7 Технология выплавки чугуна в индукционной электропечи.....	39
1.8 Синтетический чугун.....	41
1.8.1 Преимущества синтетического чугуна.....	41
1.8.2 Особенности выплавки синтетических чугунов.....	43
1.8.3 Выплавка синтетического чугуна в индукционной печи.....	52
1.9 Выводы к главе 1.....	53
2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2.1 Общее описание эксперимента.....	Error! Bookmark not defined.
2.2 Сборка подовых секций экспериментальных электролизеров.....	Error! Bookmark not defined.
2.3 Методика нагрева катодных секций.....	Error! Bookmark not defined.
2.4 Методика выплавки чугуна.....	Error! Bookmark not defined.

2.5 Методика исследований.....	Error! Bookmark not defined.
2. 5.1 Методика отбора проб чугуна.....	Error! Bookmark not defined.
2.5.2 Определение химического состава проб чугуна	Error! Bookmark not defined.
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОДИНЕ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
Выводы к главе 3	Error! Bookmark not defined.
4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО РЕШЕНИЯ.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.1 Техничко-экономические показатели совершенствования технологии сборки подовых секций.....	Error! Bookmark not defined.
4.2 Техничко-экономические показатели замены литейного.....	Error! Bookmark not defined.
чугуна на синтетический	Error! Bookmark not defined.
4.3 Выводы к главе 4.....	Error! Bookmark not defined.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий наиболее распространенный металл в земной коре. Благодаря уникальному сочетанию свойств, таких как высокая тепло- и электропроводность, низкая плотность, высокая пластичность, коррозионная стойкость и достаточно высокая механическая прочность, алюминий получил широкое применение во всех областях человеческой деятельности [1]. Тем не менее, в промышленных масштабах алюминий стали получать совсем недавно. В 1890 году француз Поль Эрру и американец Чарльз Холл независимо друг от друга запатентовали электролитический способ получения алюминия методом электролиза глинозема, растворенного в криолите. Благодаря этому открытию в 1900 году в мире производилось уже около 5700 тонн алюминия в год, а в 1974 году - более чем в 400 раз больше. Таким образом, единственным промышленным способом производства алюминия в течение последних 130 лет остается электролиз криолит-глиноземного расплава. Вместе с тем, при производстве алюминия остается много проблем, требующих технических решений, в частности в вопросах повышения срока службы алюминиевых электролизеров. На наиболее передовых Российских предприятиях срок службы электролизеров может составлять до 10 лет [2], тем не менее, нередки случаи несвоевременного выхода из строя электролизеров. Авторы многих работ [2-19] единогласно сходятся во мнении, что основная проблема преждевременного выхода из строя электролизера заключается в пониженной стойкости катодной футеровки к продуктам электролиза, которые проникают в ее микротрещины и поры, вызывая разбухание и разрушение.

В настоящее время в условиях постоянного повышения цен на электроэнергию, вопрос снижения энергопотребления при производстве, стоит весьма актуально. В отечественном производстве, в том числе на предприятии ООО «Инжиниринг Строительство Обслуживание», г. Саяногорск, с целью экономии электроэнергии заделка контакта подовый блок – катодный стержень проводится чугуновой заливкой при температуре расплава чугуна порядка 1300 °С, чем достигается снижение падения напряжения в этом узле. Таким образом,

одной из причин возникновения трещин в углеродных материалах катодных подовых секций является получение термического удара в процессе заливки расплавом чугуна, приводящего, к тому же, к деформации подовых блоков из-за существенного различия температурных коэффициентов линейного расширения стальных стержней и углеграфитовых блоков. Согласно многим литературным данным [4, 7, 13, 20] термоудара можно избежать предварительным нагревом катодных стержней и подовых блоков в интервале температур 300-1000 °С.

В то же время, увеличения срока службы катодного устройства и снижения затрат на электроэнергию можно добиться за счет повышения качества чугунной заливки. Как известно, доменные чугуны обладают «неблагоприятной наследственностью», когда выплавленному чугуну передаются наследственные свойства переплавленного металла. По этой причине доменные чугуны отличаются нестабильностью свойств от партии к партии, наличием ликвации плотности, неоднородностью распределения легирующих элементов и графитовых включений, различным содержанием и размерами примесей, формой графитовых включений. Нередко неравномерность структуры чугуна является причиной производственного брака, что недопустимо в условиях монтажа электролизера, так как несвоевременный выход из строя катода приводит к выходу из строя всей установки. В качестве выхода из сложившейся ситуации предлагается переход на использование синтетического чугуна, особенностью которого является отсутствие «неблагоприятной наследственности», более высокая дисперсность и однородность структуры, меньший разброс прочности и плотности в масштабах одной заливки, более высокая пластичность. Использование при производстве синтетического чугуна отходов в виде стальной и чугунной стружки снижает себестоимость заливки на 25-30% по сравнению с доменным чугуном. Вместе с тем из-за высокой склонности к отбелу рекомендуется при литье синтетического чугуна добавлять доменный чугун.

Цель работы: разработка технологических и технических решений, обеспечивающих снижение расхода электроэнергии на 150 кВтч/т Al и увеличение срока службы электролизера путем повышения качества контакта «подовый блок – катодный стержень» с применением заливки из синтетического чугуна.

Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

7. Анализ влияния технологических параметров электролиза на стойкость катодных подовых секций, определение причин разрушения футеровочных материалов и мест их локальных структурных изменений в катодном устройстве электролизера.

8. Определение оптимальных параметров предварительного нагрева блюмсов и подовых блоков, исключающих последствия термоудара в процессе заливки чугуном катодных подовых секций.

9. Определение условий получения высококачественного чугуна с мелкозернистой однородной структурой. Изучение особенностей технологии производства синтетического чугуна при применении установки индукционного нагрева.

10. Улучшение существующего технологического процесса монтажа путем введения предварительного нагрева катодных стержней и блоков с использования синтетического чугуна в качестве заливки подовых секций;

11. Исследования динамики падения напряжения в подине и напряжения в электролизере в процессе эксплуатации;

12. Определение технико-экономической эффективности используемых технологических решений;

13. Минимизация негативных факторов, влияющих на целостность и дальнейшие эксплуатационные характеристики подового блока, а именно:

- исключение деформации подового блока и блюмса;
- исключение термоудара и снижение вероятности образования термических трещин в подовом блоке;

- снижение потерь тепла в период между окончанием операции по нагреву блока и блюмса до начала операции по заливке чугуна;

- уменьшение энергопотребления катодного устройства за счет снижения контактного сопротивления в контакте «подовый блок – катодный стержень»

Методы исследований

В работе использованы экспериментальные методы исследований. Для выплавки чугуна использована индукционная тигельная электропечь промышленной частоты 50Гц емкостью 2,5 т марки ИЧТ–2,5, температура выплавки - 1450 °С. Оценка качества выплавки проводилась путем исследования химического состава пробы с помощью эмиссионного спектрометра ARL-72000.

Для определения эффекта снижения расхода электрической энергии от способа заделки катодного стержня подовые секции электролизеров собирались двумя способами:

1. По технологии заделки контакта «подовый блок – катодный стержень» чугуновой заливкой с предварительным нагревом катодных секций. Для предварительного нагрева катодных секций использована установка Hotwork. Температура нагрева катодных секций составляла 470-520 °С, время выдержки при нагреве - 100 мин. После заливки чугуном оценивалось состояние подовых блоков и блюмсов на наличие трещин и деформации.

2. Подовые блоки собраны по действующей технологии с заделкой катодного стержня подовой массой марки МХТ-К;

Оценка качества заделки контакта «подовый блок – катодный стержень» проводилась путем:

а) исследования динамики перепада напряжения в подине в течение 12 месяцев после пуска;

б) исследования динамики напряжения в электролизере в течение 12 месяцев после пуска.

Практическое применение

Настоящим проектом предлагается для всех типов электролизеров, футеруемых в ОАО «РУСАЛ Саяногорский Алюминиевый завод» осуществить переход на технологию заделки контакта «подовый блок – катодный стержень» чугуновой заливкой на основе 70% синтетического чугуна с предварительным подогревом подовых секций и блюмсов при температуре 470-520 °С, что позволит избежать образование трещин и деформации подовых блоков, снизить контактное сопротивление в контакте «подовый блок – катодный стержень», энергопотребление электролизера, расходы на сырье при заливке катодных подовых секций чугуном.

Планируемые результаты

При реализации планируемых мероприятий в рамках данного исследования мы планируем получить следующие результаты:

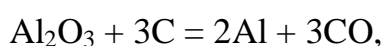
- снизить удельный расход электроэнергии;
- снизить расходы на сырье при заливке катодных подовых секций синтетическим чугуном на 17,5 %.
- увеличить срок межремонтного периода промышленного алюминиевого электролизёра.

1. АЛЮМИНИЕВЫЙ ЭЛЕКТРОЛИЗЕР: КОНСТРУКЦИЯ И ПРИЧИНЫ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ. ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА ДЛЯ ЗАЛИВКИ КАТОДНЫХ СТЕРЖНЕЙ

1.1 Теоретические основы получения алюминия

По масштабам производства и потребления алюминий занимает второе место в мире, после стали [1]. Алюминий успешно используется практически во всех сферах человеческой деятельности – в сельском хозяйстве и строительстве, в электротехнике, в авиа- и автомобилестроении, в пищевой, нефтяной и химической промышленности, в атомной технике и судостроении. Широкое применение металла обусловлено уникальной совокупностью физико-механических и технологических свойств, таких как: высокая пластичность, низкая плотность, высокая коррозионная стойкость и гигиеничность, широкие пределы регулирования механической прочности и способность сохранять прочностные характеристики при низких температурах, пониженное значение предела выносливости при циклических нагрузках, немагнитность, высокие значения электропроводности и теплопроводности. [1].

Наиболее распространенным способом получения большинства металлов (железа, никеля, меди) является восстановление их соединений с другими элементами. Количество энергии, затрачиваемое на процесс восстановления, определяется химической прочностью соединений и зависит от активности образующих его элементов. Для активных элементов, таких как алюминий, восстановление требует больших расходов энергии - теплота образования Al_2O_3 составляет 1670 кДж/моль. При высокой температуре алюминий восстанавливается углеродом [2]:



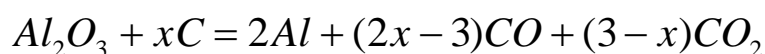
Однако, вследствие высокой активности, одновременно с восстановлением, происходит процесс карбидообразования алюминия:



Поэтому, как показала практика, для высокоэнергетических реакций восстановления металлов наиболее целесообразным с экономической и технической точки зрения является подведение энергии в форме электрической с целью электрохимического разложения соединения в растворе воды или в расплаве [2]. Вместе с тем, метод выделения алюминия электролизом из водных растворов также не нашел применения, так как из-за высокого отрицательного потенциала Al на катоде в первую очередь выделяется водород [3].

Таким образом, современное производство алюминия основано на электролитическом разложении расплава оксида алюминия (Al_2O_3) на металлический алюминий и газообразные продукты в процессе электролиза.

Обобщенная реакция, происходящая при электролизе, может быть выражена уравнением [4]:



Основное сырье данного метода, глинозем, получают гидрометаллургическим переделом из минерального сырья, содержащего алюминий. Электролиз криолитоглиноземного расплава в настоящее время является практически единственным методом получения алюминия.

На рис. 1.1 представлена общая схема производства алюминия электролизом в устройстве, получившем название электролизер. Электролизер представляет собой установку, состоящую из выложенной углеродистыми блоками ванны, в которую опущен угольный анод. Катодом служит подина ванны, к которой подводится электрический ток. Электролитом выступает расплав криолита с небольшим избыточным содержанием фторида алюминия и растворенным в нем глиноземом. В процессе электролиза при температуре 950-960 °С происходит разложение глинозема и выделение алюминия на катоде (у поверхности алюминий – электролит). Расплав алюминия тяжелее электролита,

поэтому собирается на дне подины, откуда его периодически откачивают с помощью вакуумного ковша [3].

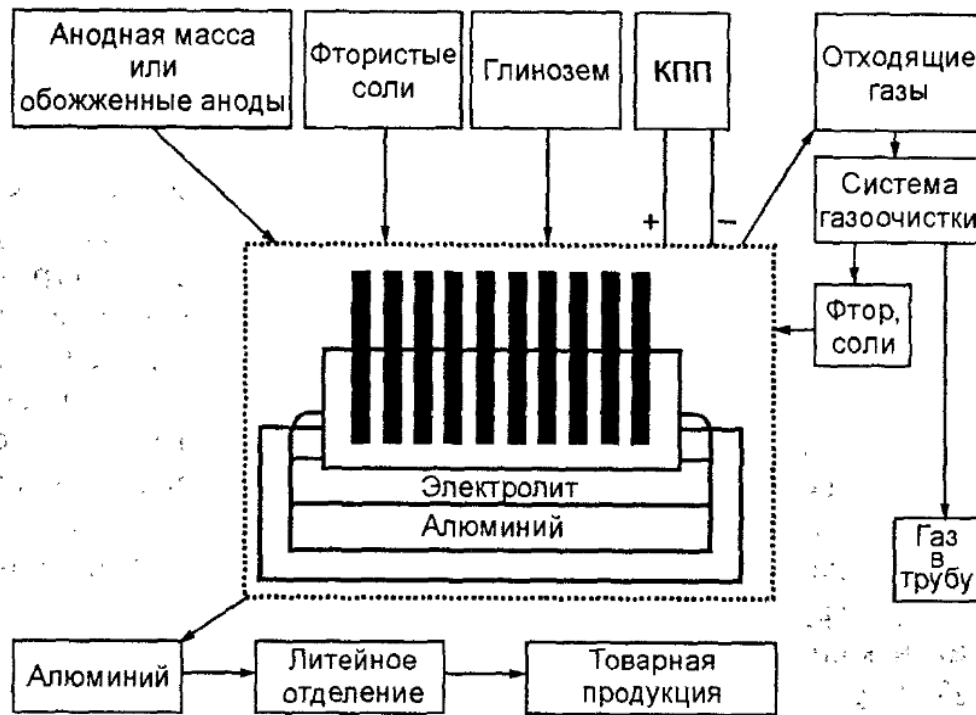
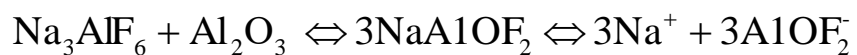


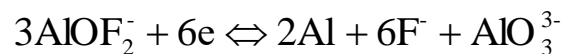
Рисунок 1.1 - Схема производства алюминия из глинозема [3].

Согласно современным представлениям криолитоглиноземные расплавы состоят из катионов Na^+ и оксифторидных анионов AlOF_x^{1-x} . В упрощенном виде взаимодействие криолита и глинозема можно описать реакцией:

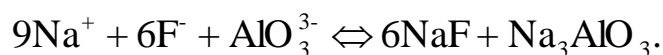


Перенос тока на 99 % осуществляется ионами Na^+ .

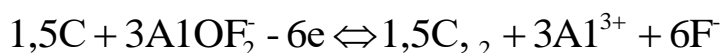
Катодный процесс сводится к разрушению оксифторидных ионов, выделению алюминия и накоплению в прикатодном слое ионов F^- и AlO_3^{3-} :



При переносе тока к катоду подошло шесть ионов Na^+ и три иона Na^+ остались от диссоциации 3NaAlOF_2 , поэтому в прикатодном слое происходит накопление ионов фторида и алюмината натрия:



На аноде в результате разрушения оксифторидных ионов подвергаются разряду O^{2-} с образованием CO_2 и накапливаются ионы Al^{3+} и F^- :



Анионы $AlOF_2^-$ малоподвижны и практически полностью остаются у анода. Изменение состава электролита у анода можно выразить:



Таким образом, в процессе электролиза прианодный слой электролита насыщается фторидом алюминия, а прикатодный - фторидами натрия [4, 24].

Основными векторами эволюционного развития конструкции современных электролизеров, являются повышение мощности установок, увеличение выхода готовой продукции и повышение срока службы оборудования. Рассмотрим подробнее эволюцию конструкции современных электролизеров с точки зрения этих позиций.

1.2 Эволюция конструкции анодов

Различают два типа угольных анодов – обожженные, состоящие из предварительно обожженной смеси кокса и связующего (пека) и самообжигающиеся, в которых для обжига смеси кокса и пека используется тепло анода. Электролизеры, с предварительно обожженными анодами, применявшиеся вплоть до первой половины 20-го века, отличались небольшой по сравнению с современными мощностью - до 10 кА, невысокой плотностью тока - $0,14 \div 0,65 \text{ А/см}^2$ и довольно большой энергоемкостью - расход электроэнергии на производство алюминия составлял $25000 \div 80000 \text{ кВт ч/т}$ [4, 5]. С 30-х годов двадцатого века по патенту Содерберга стали внедряться конструкции с непрерывными самообжигающимися электродами. Однако высокое падение напряжения в прижимном контакте, производимом посредством прижимных контактных плит, оказывало отрицательное влияние при эксплуатации электролизеров. Ряд работ по усовершенствованию данного метода, проводившихся как в России, так и за рубежом, привели к появлению

системы бокового токоподвода (рисунок 1.2), в которой к самообжигающимся анодам электроэнергия подводилась при помощи штырей, забиваемых и неспеченную зону тела анода сбоку. При таком методе из общей схемы технологического передела были исключены операции прессования и обжига анодов, что способствовало увеличению единичной мощности электролизеров, а также ускорению и удешевлению производства алюминия. Система бокового токоподвода применяется до настоящего времени в конструкциях с силой тока 60-175 кА и плотностью анодного тока 0,7-1,0 А/см². Расход электроэнергии в таких электролизерах составляет до 16,5 тыс. кВт ч/т. [6, 21]

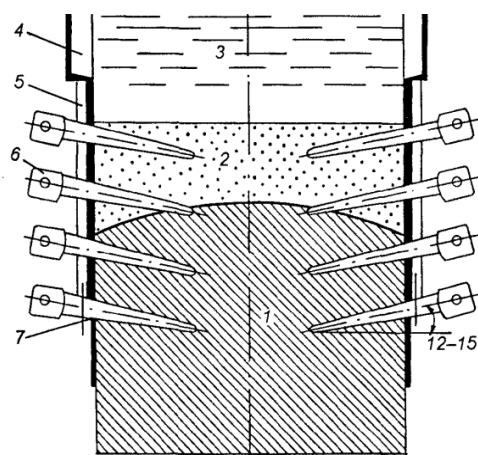


Рисунок 1.2 - Схема установки токоподводящих штырей в самообжигающихся анодах с боковым токоподводом: 1 - спеченная часть анода; 2 - полуспеченная масса обечайка; 3 - жидкая анодная масса; 4 - анодная рама; 5 - ребра; 6 - штыри; 7 - клинья [21].

Тем не менее, повышенный спрос на установки повышенной мощности привел к разработкам новой системы токоподвода, в которой штыри запекаются в анод в верхней части электролизеров. Такие установки получили название систем с верхним токоподводом (ВТ). Помимо повышенной единичной мощности применение ВТ позволило упростить обслуживание и повысить производительность установок. На рисунке 1.3 приведена схема конструкции современного электролизера с верхним токоподводом и самообжигающимся анодом. Сила тока у таких электролизеров может составлять от 100 до 600 кА, плотность тока от 0,8 до 1,1 А/см², расход электроэнергии 12-14 кВт ч/т. Схема с ВТ позволяет регулировать мощность за счет количества анодов и геометрических размеров ванны. Электролизёры

данного типа более технологичны с точки зрения получения высококачественного алюминия, более приспособлены к автоматизации операций, отличаются отсутствием в газах смолистых веществ и углеводородов [21, 22].

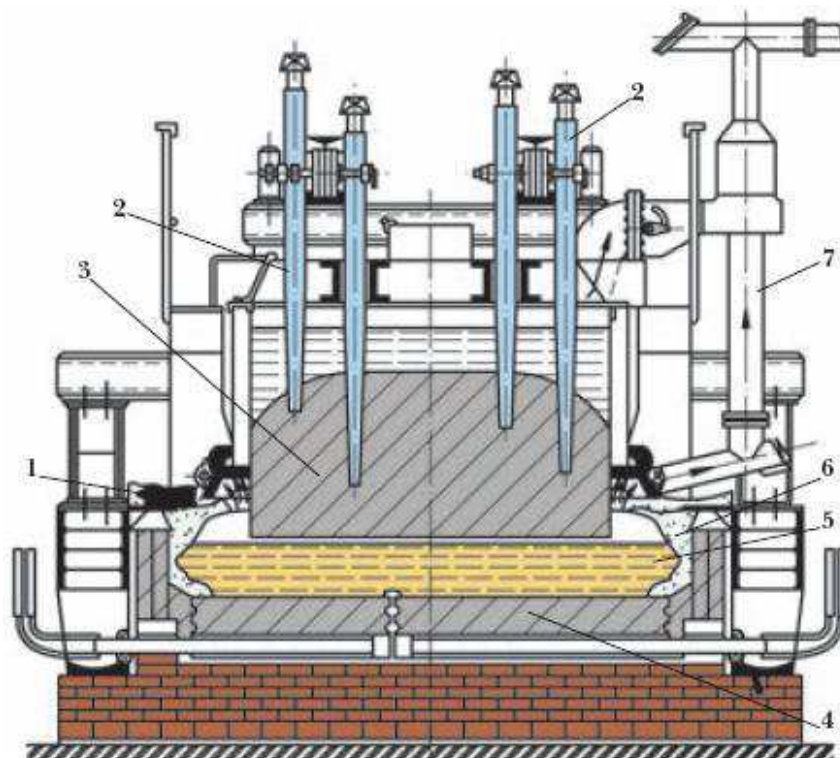


Рисунок 1.3 - Устройство электролизера с верхним токопроводом, поперечный разрез: 1 - кожух; 2 - анододержатель; 3 - обожженный анод; 4 - катод (угольная футеровка); 5 - расплавленный алюминий; 6 - глинозем; 7 – газоходы

1.3. Эволюция катодного устройства электролизера

Конструкция любого катодного устройства представляет собой ванну из углеграфитовых подовых блоков с бортами в виде угольных или карбидокремниевых плит (подину), выложенную огнеупорной и теплоизоляционной футеровкой и облицованную металлическим кожухом (рисунок 1.3). Подина катодного устройства выполняет две функции – функцию катода и функцию емкости для расплава алюминия. Ток к катоду подводится посредством стальных стержней (блумсов). Блумсы соединяются с блоками чугуновой заливкой или специальной склеивающей пастой, при этом заделка блумсов может быть однопазовая или двухпазовая. В установках

большой мощности преимущественно применяется двухпазовая заделка, позволяющая существенно снизить перепад напряжения в подине [2-6].

1.3.1 Основные типы кожухов катодных устройств

Продукты электролиза – фтористые соли, постепенно в ходе работы установки, проникают в структуру подины и огнеупорной футеровки, вызывая разбухание и образование внутренних напряжений, поэтому металлический кожух должен иметь одновременно высокую устойчивость против деформации и достаточную пластичность, чтобы компенсировать расширение подины. Конструкции кожухов могут быть двух типов: катоды с кожухом рамного типа без днища (роль днища выполняет цоколь из огнеупорного кирпича, кожух крепится к цоколю с помощью анкерного крепления) и катоды, имеющие металлический кожух с днищем (рисунок 1.4).

В катодных устройствах рамного типа (рисунок 1.4, а) большое значение имеет качество крепления кожуха к цоколю, так как отрыв кожуха чреват деформацией всего катодного узла и выходу из строя электролизера. Ремонт такой конструкции сопровождается разборкой всего цоколя и является трудоемкой и продолжительной операцией. Это является основным недостатком конструкций катодных устройств данного типа. Кожухи рамной конструкции в основном применяются в электролизерах небольшой мощности как БТ, так ВТ типа при токах до 130кА [2, 4].

Катодные устройства, имеющие кожух с днищем считаются более удобными с этой точки зрения. Различают несколько видов конструкций данного типа: цельносварные контрфорсные (рисунок 1.4, б), шпангоутные с вертикальными (рисунок 1.4, в) и наклонными стенками, рамно-шпангоутные.

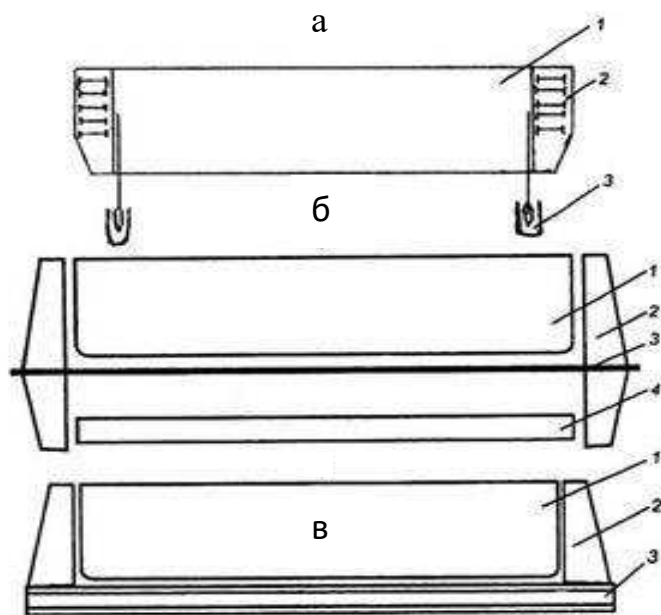


Рисунок 1.4 - Конструкция катодных кожухов: а - рамный кожух без дна: 1 - кожух; 2 - швеллерные балки; 3 - анкерное крепление; б - контрфорсный кожух с дном: 1 - кожух; 2 - контрфорсная балка; 3 - стягивающая шпилька; 4 - распорная балка; в - шпангоутный кожух с дном: 1 - кожух; 2 - шпангоутное устройство; 3 - распорная балка

В конструкциях контрфорсного типа борта кожуха укреплены вертикальными балками, защищающими кожух от деформации. Балки жестко крепятся к дну посредством шпилек, при этом в нижней части между противоположными вертикальными балками устанавливают в распор горизонтальные балки. Дополнительно стенки кожуха, выполненные из листа 8-10мм, усиливаются продольными поясами жесткости.

В катодных устройствах шпангоутного типа конструкция кожуха упрочняется системой жестких металлических ребер (шпангоутов), которые отличаются большим моментом сопротивления, распирающим усилиям между противоположными стенками кожуха. Кожух в данных конструкциях выполняется из листа толщиной 14-15 мм. Шпангоуты в верхней части связаны между собой поясом жесткости из стального профиля.

В установках с наклонными бортами шпангоуты имеют наклон, повторяющий конфигурацию ванны (15-22°).

Конструкции катодных устройств с кожухами шпангоутного типа отличаются повышенным сроком службы, на 40 % превышающим срок

службы конструкций с контрфорсными кожухами. Тем не менее, высокая жесткость такого кожуха требует применения катодных блоков с низким коэффициентом теплового расширения и, одновременно, точного расчета компенсационной засыпки. С точки зрения ремонтпригодности, данная конструкция существенно упрощает процесс капитального ремонта, так как позволяет проводить транспортировку установки в ремонтные помещения [7-8].

1.3.2 Конструкция подины

Подина катодного устройства одновременно выполняет функцию катода и емкости для электролита и расплава алюминия. От качества подины в большей степени зависит срок службы ванны, поэтому материал подины должен быть устойчив к высоким температурам и механическим нагрузкам в агрессивной среде и одновременно - хорошим проводником тока.

Если рассматривать конструктивные особенности, то подины можно разделить на три группы [4].

1. Монолитные подины (рисунок 1.5а).
2. Монолитные подины изготавливают путем набойки поверхности катода пластичной подовой массой. Это самый мало затратный вариант изготовления подины, тем не менее, вследствие невысокой стойкости и низкого качества такие подины в настоящее время не применяются.
3. Подины, выложенные из обожженных углеродных блоков с набивными межблочными швами (рисунок 1.5б).
4. Склеенные полумонолитные подины из обожженных и механически обработанных блоков (рисунок 1.5в).

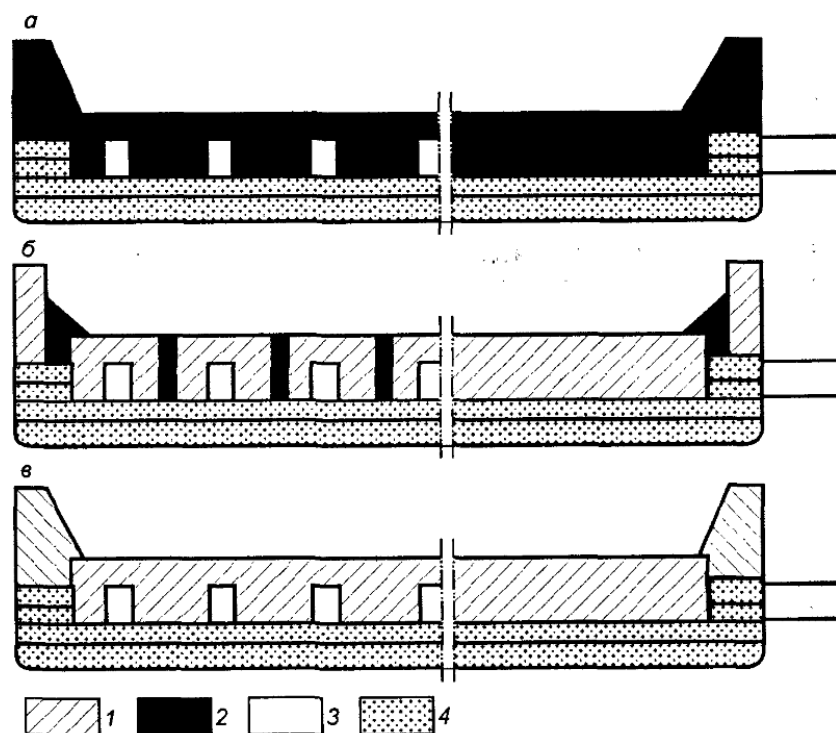


Рисунок 1.5 – Типы подин: а – монолитная, б – подина из предварительно обожженных блоков с набивными блочными швами, в – из предварительно обожженных и механически обработанных блоков, склеенных между собой [23]

Подины второй группы остаются основной конструкцией, применяемой в алюминиевой промышленности России. Межблочные швы являются слабым местом подины, так как более подвержены действию электролита и расплавленного алюминия, поэтому их наличие снижает срок службы ванны. Расположения блоков в подинах данной группы показано на рисунке 1.6. В конце двадцатого столетия предприятиями, использовавшими технологию Содерберга, повсеместно освоена данная конструкция подин. Конструкция представляет собой чередование длины аморфных катодных блоков в шахматном порядке. Шахматная подина имеет ряд недостатков. Во первых, это, как уже отмечалось, большое количество межблочных швов. Во вторых - шахматное расположение катодных блоков в подине приводит к неравномерному распределению тока и неустойчивому тепловому балансу, что также приводит, как будет показано ниже, к снижению срока службы катода.

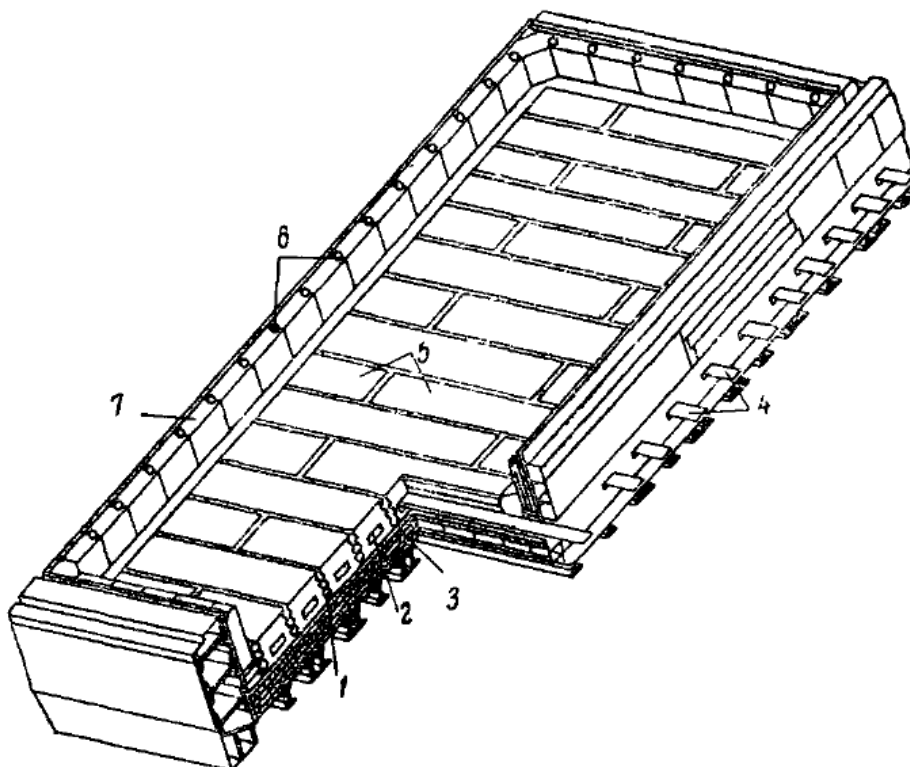


Рисунок 1.6 – Общий вид катодного устройства: 1 - швы между блоками, 2 – паз в блоке, 3 – углеродистая подушка, 4 – катодные стержни, 5 – подовые блоки, 6 – пробки из подовой массы, 7 – боковые блоки [2]

В подинах, имеющих конструкцию третьей группы, используются катодные блоки во всю ширину кожуха, что сводит количество швов к минимуму (рисунок 1.7).

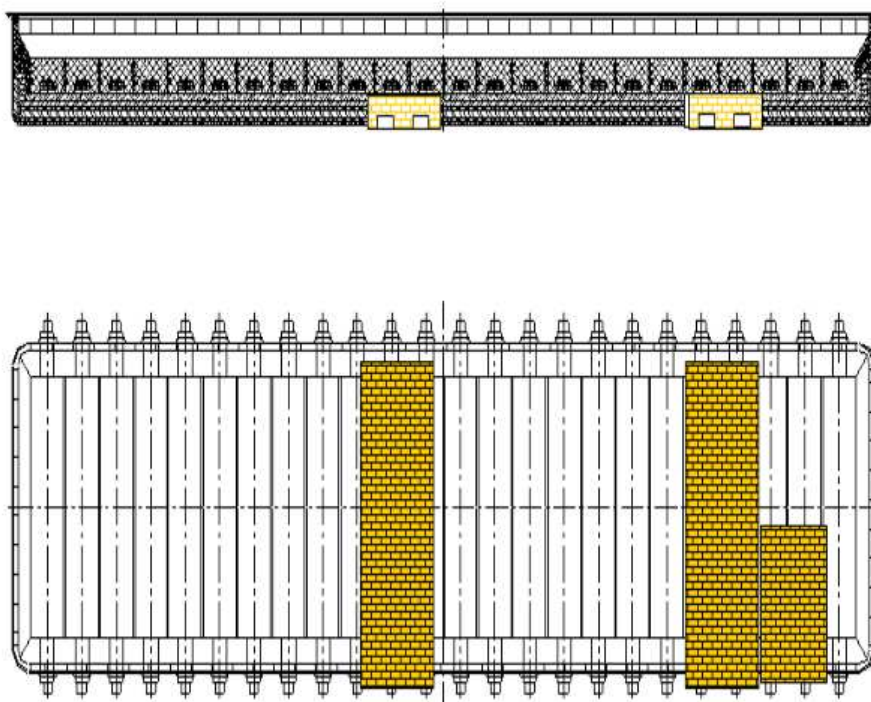


Рисунок 1.7 - Катодное устройство современного электролизера

Конструкция катодных подин третьей группы является самой совершенной и позволяет значительно увеличить срок службы электролизера. Недостатками таких конструкций являются высокая себестоимость и трудность монтажа, так как для их установки кожух необходимо выполнять разъемным. Поэтому эффективнее и целесообразнее их применение в установках большой мощности [3, 4, 25].

Методы тестирования и критерии выбора современных футеровочных материалов электролизера заложены Рапопортом М.Б. [10].

1.3.3 Материалы катодных блоков

Катодные блоки (КБ) получают прессованием углеродной массы с последующим спеканием при температурах 1150-3000 °С. Изготовленные таким образом блоки приобретают необходимую электрическую проводимость и сопротивляемость агрессивной среде электролита. Качество блоков – электропроводность, устойчивость к пропитке электролитом и к стойкость к разбуханию - значительно повышается при введении в состав исходной шихты искусственного графита от 25 до 100 %. КБ по содержанию графита делят на следующие группы: графитированные, полуграфитированные, блоки из аморфного углерода.

Графитированные блоки получают методом прессования углеродистых материалов. Спекание графитовых блоков, в зависимости от применяемой технологии, может проводится как при температурах порядка 3000 °С, так и при температурах порядка 2300 °С.

Полуграфитированные катодные блоки производят из кокса и графитированного наполнителя, с последующим прокаливанием при температуре 1200 °С.

Блоки из аморфного углерода выполняют прессованием углеродной массы из антрацита и каменноугольного пека с добавлением искусственного графита с последующим спеканием при температуре 1150-1200 °С.

В настоящее время в катодных устройствах, как уже указывалось выше, применяются катодные блоки с высоким содержанием графита, что способствует равномерному распределению тока и повышению прочности блумсов. Еще одно существенное достоинство использования КБ с высоким содержанием графита – это высокое сопротивление проникновению натрия в структуру материала в процессе эксплуатации, поэтому такие установки имеют повышенный срок службы подины [4, 7-9].

1.3.4 Бортовые блоки

Борта, ванны стандартно выполняют из угольных блоков на основе антрацита, толщина стенок которых составляет порядка 200мм. В настоящее время бортовые угольные блоки все чаще модернизируют путем использования плит на основе карбида кремния. Это позволяет снизить степень пропитки бортов продуктами электролита практически до нуля, исключить работу ванны «в борта», исключить окисление в агрессивной среде, снизить размеры и массу электролизеров, так как толщина карбидокремниевых плит в 2, а то и в 3 раза тоньше угольных блоков [4].

1.3.5 Структура цоколя катодного устройства

Высокие требования предъявляются к цокольной части катодной установки. Цоколь должен обладать механической прочностью, низкой теплопроводностью, высоким модулем упругости, низким коэффициентом смачиваемости и химической стойкостью к электролиту и другими свойствами. Так как все эти показатели невозможно совместить в одном материале, при укладке цоколя, как правило применяют дифференциальную систему футеровки [4]. На дно (рисунок 1.8) для выравнивания укладывают слой дробленого шамота или песка, далее – несколько слоев теплоизоляционного кирпича. В качестве цоколя в последние годы все чаще, также, используют пористые плиты из силиката кальция и вермукулита с высокими теплоизоляционными свойствами. Такой материал как вермукулит,

благодаря низкому коэффициенту смачиваемости, обладает устойчивостью к пропитке электролитом и отличается повышенной стойкостью в области температур 900-1000 °С. ве глинозема, силикатов, оксида кальция или из угольной подушки [2, 4, 7-9].

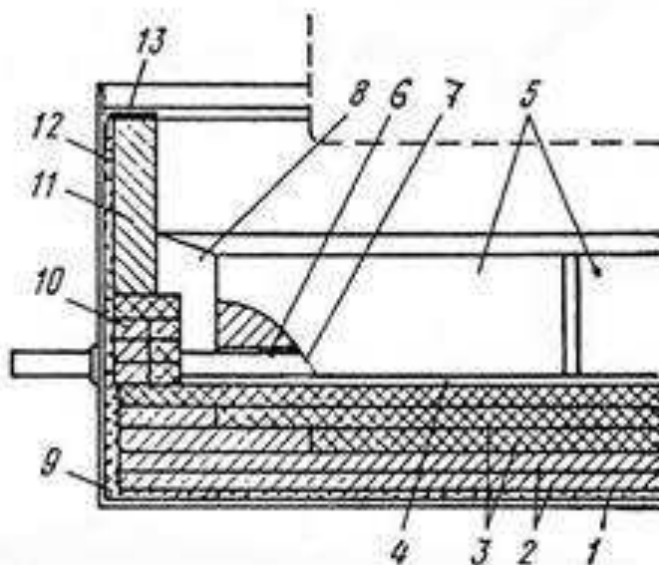


Рисунок 1.8 - Дифференцированная футеровка катодного кожуха с днищем: 1 - выравнивающая подсыпка; 2 - теплоизоляционный кирпич; 3-шамот; 4 - СБС; 5 - угольные блоки; 6 - чугунная заливка; 7 - катодный стержень; 8 - набойка из подовой массы; 9 - бортовая засыпка; 10 - бровка; 11 - бортовые плиты; 12 - выравнивающий слой засыпки бортовых плит; 13 - фланцевый лист

1.4 Ошиновка

В единую электрическую сеть электролизеры соединяет ошиновка, схема которой приведена на рисунке 1.9 [5]. Принципиальная схема ошиновки может быть двух типов - с односторонним и с двухсторонним подводом тока к аноду (рисунок 1.9 а, б).

Под действием электрического тока вокруг ошиновки электролизера создаются магнитные поля, тем более сильные, чем более высокая мощность электролизера. Магнитная индукция B и напряженность магнитного поля H связаны зависимостью:

$$B = \mu \cdot H = I \cdot \mu / 2 \pi r,$$

r – расстояние от проводника до данной точки поля, μ - константа магнитной проницаемости, для алюминия $\mu = 1$, поэтому можно записать:

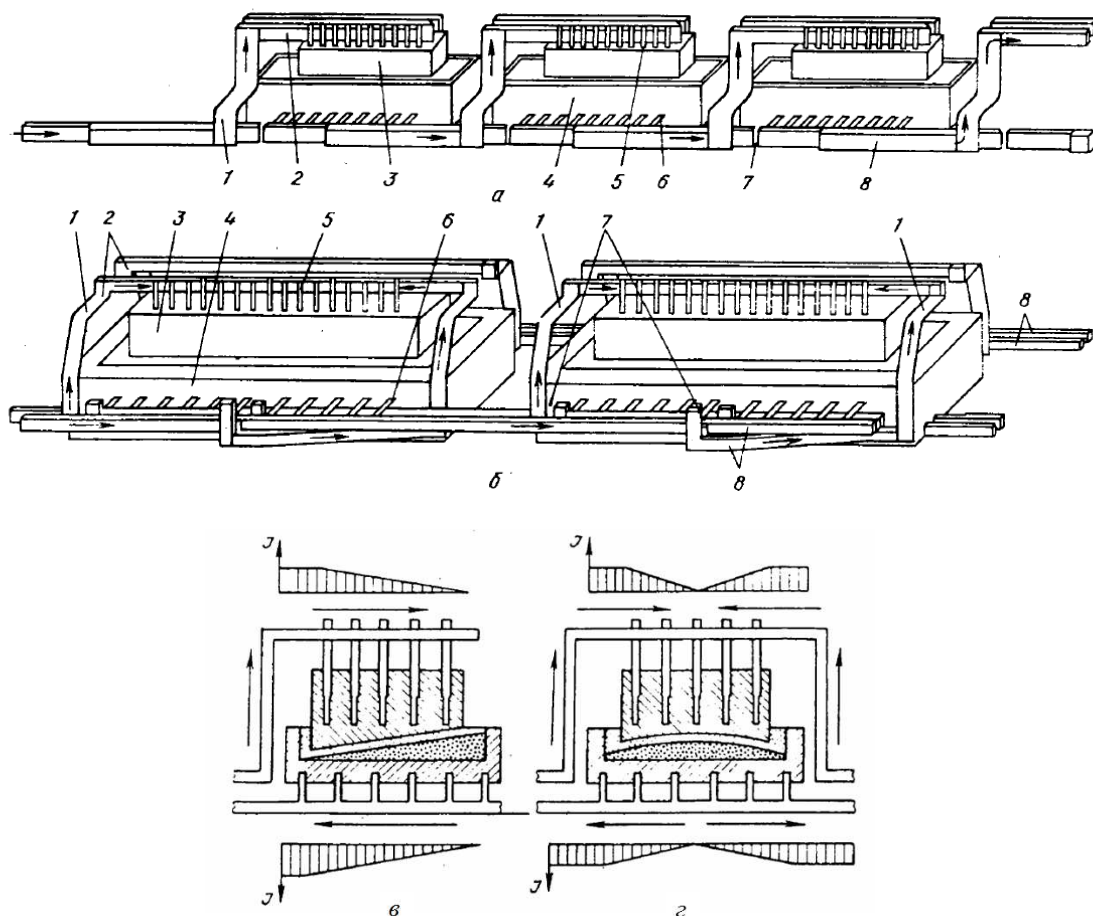


Рисунок 1.9 – Типы ошинок электролизеров и их влияние на положение расплава алюминия в ванне: *a* — односторонний подвод тока; *б* — двухсторонний подвод тока; 1 — анодный стояк; 2 — анодная шина; 3 — анод, 4 - катод; 5 — анодный штырь; 6 — катодный спуск; 7 — места шунтирования электролизера; 8 — катодная шина

$$B = I / 2 \pi r$$

Магнитное поле воздействует на проводник с силой F , которая определяется:

$$F = 0,1 \cdot (i \cdot B) = 0,1 \cdot (i \cdot H) = 0,1 (i \cdot I) / 2 \pi r$$

где F — электромагнитная сила, i — плотность тока в расплаве, H — напряженность магнитного поля.

Электромагнитная сила является векторной величиной, пропорциональной квадрату силы тока, то есть при повышении силы тока на электролизерах, электромагнитные силы возрастают в

квадрате, что требует тщательного подхода к расчету электромагнитных сил, возникающих в расплаве [4].

При одностороннем подводе тока под воздействием магнитных полей алюминиевый расплав смещается к одной стороне ванны (рисунок 1.9, в), поэтому такая схема используется для установок с силой тока до 100 кА. Для высокоамперных электролизеров с током более 100 кА используется схема с двусторонним токоподводом (рисунок 1.9 - г), при котором подача и отвод тока происходит частями, через четыре анодных стояка по четырем углам электролизера [5].

С точки зрения конструктивной совместимости разных типов катодных устройств и анодов, в электролизерах с самообжигающимися анодами при поступлении сырья в подину происходит разрушение корки и теряется большое количество тепла. Соответственно, в конструкциях данного типа допустимо применять в качестве бортов блоки из аморфного углерода с высокими теплоизоляционными свойствами. С течением времени КБ из аморфного углерода графитируются и их теплоизоляционные свойства и электрическое сопротивление становятся такими же, как и у графитизированной футеровки. Установки с обожженными анодами в основном снабжены системами автоматического питания глиноземом, поэтому в них, чтобы исключить перегрев электролита, используют бортовую футеровку из материалов с хорошей теплопроводностью [9].

1.5 Причины снижения срока службы электролизера

При рациональной эксплуатации срок службы электролизера может составлять более 10 лет [23]. Тем не менее, фактически на Российских заводах средняя длительность работы одного электролизера редко составляет более 3-5 лет, за рубежом чуть больше - 6-8 лет. Нарушение технического регламента в период пуска электролизера, резкие температурные отклонения, диффузионное внедрение натрия из электролита в углеродсодержащие части подины, процессы физического и химического взаимодействия футеровки с расплавом

электролита приводят к повышенному трещинообразованию подины, деформации и разрушению кожуха, и преждевременному выходу из строя электролизера [23, 20-28]. Типичные повреждения подин и причины их возникновения представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Типичные повреждения подин [4, 13]

Типы повреждений	Причины возникновения
Выгибание подины вверх	Вспучивание под действием Na и давления со стороны настелей
Растрескивание блоков	Выгибание подин
Растрескивание межблочных и периферийных швов	Некачественная набойка и усадка подовой массы
Образование каверн в подинах	Механическое разрушение и появление участков с повышенной проводимостью тока
Эрозия подин	Образование карбида алюминия
Расслоение подин	Вспучивание катодов

Рассмотрим подробнее причины, вызывающие деформацию подины и растрескивание блоков.

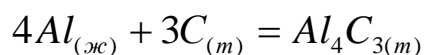
1.5.1 Диффузионное внедрение натрия

Проблема внедрения парообразного натрия в межслойные промежутки угольных катодных блоков, впервые освещенная в работах М.Б. Рапопорта [10], остается одной из основных причин снижения срока службы электролизеров. Углерод с гексагональной структурой способен принимать чужеродные атомы и молекулы между слоями своей кристаллической решетки. Натрий внедряется в межкристаллитные слои и, образуя соединения с углеродом, раздвигает кристаллическую решетку углеродного материала катодных блоков:

Происходит разбухание и деформация подины, вызывающая, в свою очередь, деформацию катодного кожуха. Внедрение натрия в межблочные швы приводит к образованию трещин и проникновению алюминия под блоки с образованием там слоя из Al и Al₄C₃, что также провоцирует выгибание

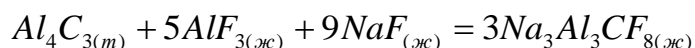
блоков вверх и разрушение футеровки катода. Как отмечается в [4], данная схема разрушения является наиболее типичной для Российских заводов.

Механизм воздействия натрия подробно исследовался в работах [26-43]. Степень диффузии натрия повышается прямо пропорционально росту катодной плотности тока и находится в зависимости от степени графитизации материала пода. В период пуска электролизера на поверхности подины образуются микротрещины, после проникновения электролита образуются длинные капилляры, способствующие проникновению натрия. Реакция образования карбида алюминия усиливается присутствием криолита (он растворяет защитные оксидные слои) и фтористых солей, и протекает до образования определенной толщины карбидного слоя на угольной поверхности:



Далее карбидный слой действует как диффузионный барьер.

Затем начинается реакция растворения Al_4C_3 :



При повышении криолитового отношения до 2,15 масс.% (при КО = 1,8), растет растворимость Al_4C_3 в электролите. При превышении значения криолитового отношения более 2,15 масс. % растворимость Al_4C_3 снова снижается (рисунок 1.10).

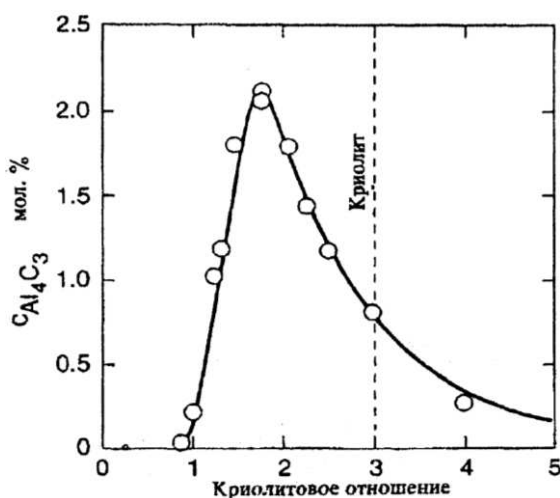


Рисунок 1.10 – Зависимость растворения Al_4C_3 с увеличением криолитового отношения [23, 32]

Для снижения влияния разрушающего действия расплава электролита на футеровочные материалы в катодной конструкции принимаются следующие меры:

- уменьшают рабочую температуру в кислых и калийсодержащих электролитах;
- проводят мероприятия по снижению сил газодинамических потоков (ГГД электролита);
- повышают магнитодинамическую стабильность установки;
- дополнительно защищают футеровку настылью и гарнисажем
- проводят разработки новых материалов, более инертных к диффузии натрием, коррозионно- и эррозионностойких к компонентам электролита.

В современной алюминиевой промышленности керамические материалы на основе карбидов и нитридов кремния все больше набирают популярность как заменители бортовых блоков из угля, так как в меньшей степени подвержены окислению на воздухе и коррозии в электролите и в расплаве алюминия. Тем не менее, использование керамических материалов не позволяет избежать локальных разрушений, из-за наличия в ванне областей с высокой плотностью тока и турбулентности металла и электролита [28-44].

Чтобы снизить степень проникновения натрия, заделку межблочных соединений выполняют из материала с комбинированным составом, состоящим из подовой массы и огнеупорных элементов на основе карбида кремния и углеграфита. Длину таких соединений выполняют равной длине подового блока, и высотой 0,35 – 1,00 от высоты межблочного соединения, а высота межблочного шва из подовой массы, при этом, должна составлять 0,3–0,5 от высоты межблочного соединения [45]. Повышение стойкости подины происходит за счет уплотнения подовой массы при расширении огнеупорных элементов во время нагрева после пуска электролизера. Благодаря входящему в состав комбинированного материала карбиду кремния, проникновение натрия вглубь подины замедляется. Соотношение высот подовой массы и

огнеупорных элементов выбрано, таким образом, чтобы исключить неровности в подине при обжиге и пуске, и снизить нарушения токораспределения [45].

Благодаря таким техническим решениям срок службы катодного устройства увеличивается, повышается чистота выпускаемого алюминия, снижаются энергозатраты.

1.5.2 Монтаж катодных стержней

Как свидетельствуют многие работы [4, 21-23] срок службы электролизера, его работа до следующего капитального ремонта закладываются в момент монтажа и пуска. В период пуска в результате температурного расширения материалов блоков и межблочных швов в области дефектов структуры образуются микротрещины, которые после проникновения электролита соединяются в длинные капилляры, способствующие проникновению натрия. Разные температурные коэффициенты расширения элементов конструкции установки могут привести к деформации футеровки, снижающей стойкость работы электролизера. С этой точки зрения наиболее ответственной операцией в процессе монтажа является установка катодных стержней.

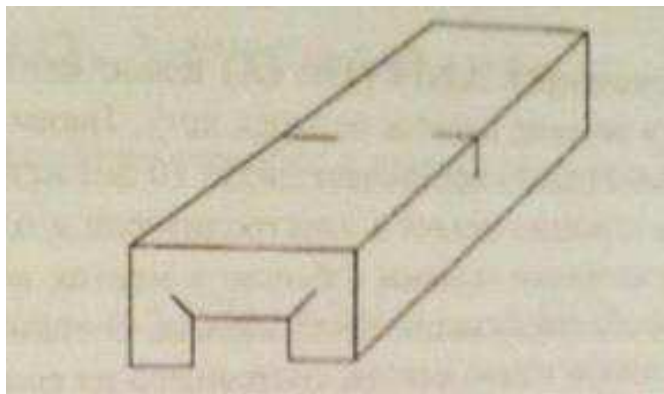
При использовании в электролизере кожуха с дном монтаж начинают с предварительного выравнивания дна шамотом или песком слоем 20-30 мм. После этого приступают к монтажу подовых секций: в катодной установке делается разметка под ячейки, в паз под катодный стержень располагают термостойкие прокладки, боковые зазоры заполняют перемычками на основе глины. Симметрично оси паза блюмс размещают в пазу таким образом, чтобы катодный стержень не доходил до конца паза на 100 мм и со стороны вылета блюмса оставалась ячейка под бетонное заполнение. Максимально допустимая несимметричность оси стержня относительно оси паза 5мм. Катодный блок с установленными стержнями получается разделенным на изолированные ячейки.

Следующим этапом после предварительного нагрева угольного блока и блюмса до 300-400 °С [3], катодный стержень закрепляют заливкой расплава чугуна в пространство между блюмсом и стенками паза в каждой ячейке. Предварительный нагрев необходим, чтобы избежать дефектов подовых блоков и блюмса в результате термоудара при заливке чугуном, так как температура расплава составляет порядка 1250 °С. Модули упругости и коэффициенты линейного температурного расширения стального катодного стержня и угольного блока на порядки различаются друг от друга, поэтому при заливке чугуном зачастую возникают следующие дефекты [19]:

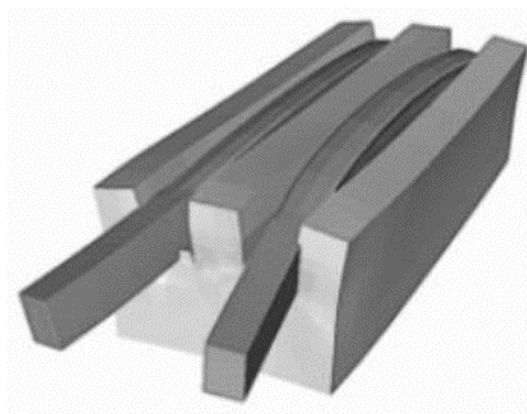
- трещины в стенках и V-образные угловые трещины в подовых блоках, образующие вследствие применения катодных блоков в виде «ласточкиного хвоста»;

- окисление поверхности подового блока и блюмса (рисунок 1.11, а);

- неравномерное распределение температуры в блоке, термические деформации, потери тепла (рисунок 1.11, б).



а)



б)

Рисунок 1.11 - Дефекты подовых блоков и блюмса: а – трещины, б - температурные деформации блока и блюмса

Во избежание образования перечисленных дефектов требуется прогревать катодный блок перед заливкой. В работе [47] определены теоретические параметры нагрева катодных стержней и подовых блоков перед заливкой чугуном. При различных условиях нагрева:

- с использованием двух нагревателей, время нагрева три часа;
- с использованием одного нагревателя, время нагрева три часа;

- с использованием одного нагревателя, время нагрева шесть часов;
- с использованием двух нагревателей, время нагрева три часа с изоляцией из картона между катодными стержнями и подовым блоком

проведено математическое моделирование теплового баланса и напряжений в системе блок – блюмс. Определено, что при предварительном нагреве подины и катодных стержней в интервале температур $400 \div 1000$ °С блок имеет относительно невысокое напряженное состояние, поэтому нет риска разрушения подового блока. Увеличение времени нагрева до 6 часов и изоляция блока от источника нагрева способствует снижению температурного градиента и равномерному прогреву по объему.

Для заливки применяют чугун с низким содержанием серы, небольшим электрическим сопротивлением и малым коэффициентом усадки, например чугун следующего химического состава: С - 2..4 %; Si – 2..3,5 %; Mn - не более 0,9 %; P - 0,05..0,08 %; S - не более 0,05 %; Cr - не более 0,3 %; $C + Si \geq 6$ %.

Чугун плавят в индукционной маломощной печи, типа ИЧТ-2,5. Температура заливки ячеек должна быть 1250 °С и более. При снижении температуры расплава до 1100 °С, операцию останавливают. При этом стремятся к тому, чтобы все катодные блоки в одну ванну устанавливали и собирали одновременно.

Заливку чугуна проводят с помощью разливочного ковша с первой ячейки первого блока, после этого заливают первую ячейку второго блока и так далее на все первые ячейки всех блоков. Когда ячейки остывают, приступают к заливке вторых ячеек и т.д. Раздел заливки блоков на ячейки позволяет избежать усадки чугуна по всей оси блюмса и предупредить отрыв стержня от блока [7-9].

Чтобы снизить вредное проявление горизонтальных токов, последнюю ячейку со стороны вылета стержня наполняют не чугуном, а огнеупорным бетоном.

В ряде случаев, особенно за рубежом, проводится практика замены чугуна на специальную электродную массу, но в нашей стране данный способ

не получил широкого распространения, так как в этом случае постепенно снижается контакт блока с блюмсом, и данная проблема в настоящий момент требует технического решения. Например, в изобретении [26], предложено стенки пазов катодных блоков полностью или частично облицевать пеннографитом (терморасширенным графитом).

Для защиты торцов блюмса от действия агрессивной среды в случае разрушения центрального шва, следующим этапом проводят заполнение участка 100 мм подовой массой.

Как уже упоминалось выше, при установке монолитных катодных секций препятствием является то, что выступающие концы блюмсов невозможно завести в окна из-за ограниченной ширины кожуха. Поэтому при монтаже цельных угольных блоков в кожухе, предварительно снимают одну из боковых стенок. По окончании работ шнеку снова приваривают к кожуху.

После установки блюмсов все оставшиеся зазоры в конструкции ванной заполняют огнеупорными смесями, проводят кладку бровки с учетом последующей установки бортов, ставят бортовые блоки и теплоизоляцию. В местах соприкосновения с блюмсами кладку притирают с минимальными зазорами, составляющими менее 1 мм. Щели между бровкой и металлическим кожухом заполняют гипсовым (алебастровым) раствором или теплоизоляционным материалом (вермикулитом или шамотным порошком). Поверх бровки укладывают борта из угольных или карбидокремниевых блоков, оставляя зазор между собой менее 1 мм и с кожухом около 25-50 мм.

Самым ответственным моментом монтажа является заделка швов в подине, так как основная причина аварийных остановок заключается в нарушении швов.

Для заполнения швов между блоками и заделки периферийных швов чаще всего применяют «холодонабивную» подовую массу, имеющую эластичность и высокую уплотняемость при комнатных температурах.

После заделки швов выполняется монтаж анодного оборудования, проверяется электроизоляция, герметичность газоходов, качество установки остальных конструкций [2-5, 27].

1.6 Технология получения высококачественного серого чугуна

Важным фактором, определяющим срок службы электролизера, является качество заливки чугуном катодных стержней в катодных подовых секциях. Несмотря на появление новых технологий, заливка чугуном остается в настоящий момент наиболее предпочтительным способом заделки контакта катодного стержня, позволяющим снижать контактное сопротивление в установке. Повышение качества заливки возможно двумя путями – предварительным нагревом подовых секций, исключая деформацию подовых боков в процессе монтажа блюмсов (подробно рассмотрено выше), и повышением качества материала, посредством которого проводится заливка, то есть качества самого чугуна.

При выплавке качественного серого чугуна всегда есть вероятность получения отбела. Это связано с тем, что в качестве требований к такому чугуну предъявляется наличие преимущественно перлитной структуры – структуры на грани отбела. Несоблюдение дозировок шихты и любые нарушения режима плавки или модифицирования чреваты получением так называемого половинчатого или белого чугуна. Поэтому стабильность химического состава является важнейшим требованием, которое предъявляется к жидкому металлу в процессе плавки. С другой стороны, снижение углеродного эквивалента уменьшает жидкотекучесть и повышает температуру проведения процесса. Допустимая концентрация вредных примесей составляет в чугуне: серы – не более 0,12 %, фосфора – не более 0,3 %, что на стандартной шихте достигается в печах с кислой футеровкой [48]. Таким образом, технология производства для получения качественного серого чугуна должна обеспечивать выполнение следующих мер:

- применения шихтовой смеси четко дозированного состава;

- соблюдения регламентированного режима перегрева и продолжительности выдержки;
- обеспечения контроля плавки на всех этапах технологического передела и оперативного воздействия на него;
- проведения внепечной обработки сплава.

1.6.1 Влияние легирующих добавок на структуру и свойства чугуна

Марганец повышает растворимость углерода в аустените, образует твердые растворы с ферритом и цементитом, способствуя уменьшению количества графита в чугуне. Марганец повышает количество перлита в матрице чугуна, что снижает его пластичность и вязкость, но повышает прочность и твердость. При содержании Mn более 0,5% повышается прокаливаемость чугуна и его склонность к отбелу. Марганец нейтрализует вредное влияние серы, путем образования высокоплавкого сульфида, тем самым устраняет красноломкость металла. Обычно содержание марганца в сером чугуне составляет 0,5-0,8%. Повышение содержания Mn до 0,8-1,0% способствует повышению механических свойств чугуна, это благоприятно действует на отливки с тонкими стенками. При содержании 1,2% полностью подавляет формирование феррита в тонких частях отливок [49-57].

Кальций и барий - химически очень активны, образуют в чугуне устойчивые соединения с кислородом, серой, азотом, и водородом, обладают высокой сорбционной склонностью. Не взаимодействуют с железом и не образуют устойчивых карбидов. Данные элементы широко используются для рафинирования и модифицирования чугуна в составе комплексных модификаторов типа Fe - Si - Mg – Ba. Наличие **кальция и бария** в комплексе с другими модификаторами позволяет снизить количество магния в чугуне. Присутствие кальция более 2,5 % в комплексе с другими модифицирующими элементами типа Fe-Si-Mg-Ba способствует увеличению степени графитизации. Количество включений графита увеличивается, поэтому

снижаются усадочные дефекты и снижается выход бракованной продукции. [48-50]

Олово. При содержании олова в составе 0,13-0,3 % происходит увеличение механических характеристик материала - твердости и прочности, что вызвано повышением содержания перлита и увеличением степени его дисперсности. Повышение структурной стабильности перлита приводит, также, к увеличению жаростойкости чугуна и уменьшает размерные изменения в процессе его получения. При использовании олова нужно иметь в виду, что данный элемент увеличивает отбел чугуна. Также, применение олова приводит к изменению структурного строения графита от типов ПГр8 и ПГр9 к типу ПГр1. При содержании олова в количестве 0,1 % и охлаждении со скоростью более 0,12 °С/с в отливках преобладает перлитная структура даже при низком содержании марганца и меди [49, 51].

1.6.2 Вредные примеси и дефекты в структуре чугуна

Фосфор – вредная примесь для чугуна, способствует значительному увеличению размеров графита от 30 до 180 мкм. Вместе с тем, не образует устойчивых карбидов и не обладает повышенной сорбционной склонностью, поэтому в процессе графитизации не участвует. С повышением содержания фосфора в чугуне увеличиваются количество и дисперсность перлита в металлической матрице. Допустимое содержание фосфора 0,1-0,3 %, так как при таких количествах он находится в чугуне в растворенном состоянии. Повышение содержания до 0,5-0,7 % приводит к увеличению хрупкости, что связано образованием тройной фосфидной эвтектики ($\text{Fe}+\text{Fe}_3\text{P}+\text{Fe}_3\text{C}$), выделяющейся по границам зерен в виде хрупкой сплошной сетки. Наличие фосфора в количестве более 0,5 % существенно снижает термоциклическую прочность чугуна. Влияние серы в чугуне проявляется через выделение по границам зерен хрупкой тройной эвтектики Fe_3C и FeS с температурой плавления 988 °С [51]. Фосфор снижает обрабатываемость чугуна, но повышает жидкотекучесть и износостойкость, поэтому в изделиях работающих

на истирание допустимо до 0,7-0,8 % фосфора. В отливках художественного литья может быть до 1 % фосфора. [48-53]

Сера - вредная примесь, так как при затвердевании расплава образуется сернистое железо (FeS), которое снижает жидкотекучесть, повышает усадку и увеличивает склонность чугуна к образованию трещин. Сернистое железо образует с железом легкоплавкую эвтектику (Fe+FeS) с температурой плавления 988 °С. При охлаждении эвтектика (Fe+FeS) выделяется по границам зерен, приводя к охрупчиванию и понижению прочности чугуна при повышенных температурах, т. е. к красноломкости. Усиливает отрицательное влияние серы ее склонностью к дендритной ликвации, присутствие серы и её сульфидов тормозит распад цементита и перлита, что повышает время отжига и энерго- и трудоемкость литья. Нейтрализуют вредное действие серы легированием марганца в 5-7 раз превышающим содержание серы, так как с Mn сера образует тугоплавкое соединение MnS ($T_{пл}=1620$ °С), большая часть которого переходит при плавке из жидкого чугуна в шлак. Допустимое содержание серы в качественном высокопрочном чугуне должно быть не более 0,03 %, для стандартных марок – не более 0,12 %.

Наличие примесей в исходных чугунах - это наиболее устойчивый наследственный признак [53-57].

Десульфурация чугуна. Для получения высококачественного чугуна требуется проводить десульфурацию. Существуют разные способы очистки от серы: реагенты вводятся в металл в струе газа, непосредственно в металл, в шихту или другими способами. Обычно сода вводится в парообразном или измельченном состоянии. Карбид кальция CaC_2 добавляют непосредственно в металл. После качественной обработки десульфурующими реагентами содержание серы можно снизить до 0,001-0,015 %. Повышая температуру металла, и уменьшая таким образом вязкость и повышая скорость диффузии можно увеличить степень десульфурации.

Степень очистки металла от серы определяется, также, содержанием серы в исходной стружке. При десульфурации карбидом кальция, чем меньше

серы в исходном составе, тем больший требуется расход реагента. С другой стороны, повышение содержания углерода в чугуна способствует увеличению степени десульфурации при обработке карбидом кальция. Карбид кальция с крупными зёрнами снижает содержание серы в чугуна в большей степени, чем мелкие. При использовании карбида кальция нужно помнить, что постоянное использование данного реагента снижает стойкость кислой футеровки. [53-57]

Ликвация – может наблюдаться в виде неоднородности плотности и виде химической неоднородности в отдельных частях отливки (зональная ликвация) или в отдельных кристаллах (внутрикристаллитная ликвация). Ликвация может быть прямой, когда неоднородность перемещается от периферии к центру отливки, и обратной, когда перемещение неоднородности происходит от центра к периферии. У чугуна с шаровидным графитом склонность к зональной и дендритной ликвации больше, чем у чугуна с пластинчатым графитом. В заэвтектическом чугуна наибольшая ликвация углерода. Добавление магния способствует ликвации углерода в междендритные пространства. При низком содержании кремния и углерода у чугуна склонность к прямой ликвации кремния, при увеличении содержания этих элементов происходит обратная ликвация кремния [49-53, 60, 61].

1.6.3 Технология модифицирования

Самым распространенным и наиболее простым и эффективным способом повышения прочностных свойств чугуна является *модифицирование*.

Наиболее распространенным модификатором при получении серого чугуна является ферросилиций ФС75, который обладает как раскисляющими, так и графитизирующими свойствами. При помощи модификации ферросилицием удается снизить отбел, получить мелкозернистую структуру, улучшить механические характеристики чугуна. Массовая доля модификатора, в зависимости от условий производства может регулироваться в пределах 0,2..0,4 % для СЧ25, 1,5..2 % для СЧ45.

Стандартно ферросилиций добавляют в ковш под струю металла, на желоб, в литниковую чашу или в форму. С целью получения равномерного распределения по объему следует, после введения модификатора в расплав его перемешать. При получении плавки до 2т рекомендуется использовать фракцию 2..5 мм, при обработке большего количества расплава фракция может быть 5-15мм. При таком введении модификатора может усваиваться 70..90 % кремния. Предварительно модификатор рекомендуется обжечь при 300..400 °С в течение 1..2 ч.

В зависимости от марки чугуна температура плавки при выпуске из печи должна быть 1420..1460 °С [62-66].

1.6.4 Особенности выплавки чугуна в индукционной электропечи

Индукционная плавка [67-69] отличается наличием двух составляющих подачи энергии в нагреваемое тело – магнитной (образует в нагреваемом объекте замкнутые, вихревые токи) и электрической (ток проводимости не замкнут и продолжается вне объекта током смещения). В случае, если размеры тела больше длины электромагнитной волны, подача энергии происходит в виде электрической и магнитной составляющей одновременно. Таким образом, металл в печи постоянно находится под действием электромагнитного поля. Этим и определяются особенности плавки в индукционной электропечи:

1. Подача тепла производится без участия газа, поэтому плавку можно проводить в любой контролируемой среде – вакууме, воздухе, газе специального состава.

2. Нагрев и плавления металла происходят довольно быстро, поэтому процесс происходит с минимальным угаром.

3. Недостаток кислорода препятствует протеканию окислительно-восстановительных реакций, что нужно учитывать при подготовке шихты. Переплавка в данном методе является предпочтительной.

4. Упрощается контроль содержания углерода за счет отсутствия в печи углеродных электродов.

5. Действие электромагнитного поля создает в жидком металле аэродинамические потоки, постоянно перемешивающие расплав и ускоряющее все диффузионные процессы. Поэтому такие сплавы отличаются высокой однородностью хим. состава по объему.

6. Взаимодействие между шлаком и расплавом сведено к минимуму, из-за того, что температура шлака ниже температуры расплава. На первое место выходит взаимодействие с футеровкой и атмосферой печи, поэтому состав выплавки регулируют футеровкой печи.

1.7 Технология выплавки чугуна в индукционной электропечи

В современных литейных цехах с индукционными печами операции загрузки шихты механизированы [71-72]. Поступление добавок проводится последовательно через заданные интервалы времени. Чтобы не повредить тигель, смесь должна подаваться с достаточно низкой высоты, желательно, чтобы не падала, а сползала, что решается конструктивно путем применения различных механизмов типа склизов, вибрационных конвейеров, т.п. Для повышения сроков эксплуатации оборудования при проектировании необходимо предусмотреть, чтобы при поступлении шихты удар о футеровку должен быть боковым, так как в этом случае футеровка работает на сжатие. При верхней подаче смеси футеровка работает на срез, при вертикальном ударе нагрузке подвергается наиболее хрупкая ошлакованная часть футеровки. Необходимо организовать предварительный подогрев шихты перед загрузкой. Если подогрев не возможен, во избежание выбросов при использовании влажного и промасленного сырья, подача шихты в расплав должна быть постепенной, а первую порцию сырых компонентов необходимо подавать при отключенной печи.

Плавка в индукционной печи может быть как непрерывной, так и прерывной. При непрерывной плавке выход металла из печи за один раз составляет не более 1/10 всего металла. Контроль температуры и химического

состава проводятся через более длительные интервалы времени, чем при прерывном способе. Преимущество непрерывного метода – возможность автоматизации работы печи и достичь оптимальной работы оборудования. Используя непрерывную плавку необходимо учитывать, что размеры кусков подаваемого в печь сырья должны быть меньше, чем при прерывной плавке, так как не происходило очень быстрого растворения. Прерывная плавка характеризуется тем, что выход продукции из печи за один раз составляет 70-100%. В качестве достоинства такого метода можно выделить небольшую продолжительность реакции огнеупорной футеровки и расплава при высоких температурах, поэтому реакция $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO} + \text{Si}$ не получает должного развития. Следующее преимущество прерывной плавки - это возможность уменьшения числа проб металла для хим. анализа и сокращение времени на сопутствующие операции. Снижение мощности при систематическом опорожнении печи - серьезный недостаток прерывной плавки, поэтому при данном методе используются более емкостные печи, чем при непрерывной плавке.

При производстве чугуна выбор режима работы печи, например, частоты тока, необходимо проводить с учетом ее рабочих размеров, фракции шихты, заданного выхода готовой продукции, потребности в металле. Так, при небольшой емкости печи лучше использовать ток высокой частоты, тогда как у печей с большими ёмкостями показатели лучше при использовании низких частот. Неправильный выбор режима может привести как минимум к снижению производительности печи, в худшем случае – к увеличению выхода бракованной продукции. Например, при работе печи на частоте тока меньше оптимальной, происходит сильное перемешивание расплава, поэтому повышается вероятность увеличения содержания неметаллических включений и потерь металла за счёт его окисления. Негативные последствия сказываются и на работе оборудования, так как срок службы футеровки сокращается втрое. Если частота тока в процессе работы выше оптимальной, наблюдается слабое перемешивание компонентов металла, что нарушает гомогенность расплава,

повышает ликвацию, снижает производительность оборудования. При увеличении частоты тока следует применять шихту более мелкого фракционного состава.

Важным параметром для повышения эффективности энергопотребления является заполненность металлом объема печи, в наиболее оптимальном варианте составляющая $2/3$ высоты рабочей высоты печи, тогда доля энергии приближается к 100%. [67-72]

1.8 Синтетический чугун

Согласно [76] синтетический (передельный) чугун – чугун, который получают из стальных отходов, углеродосодержащих материалов и ферросилиция.

1.8.1 Преимущества синтетического чугуна

Как известно [49-53], доменные чугуны, полученные на разных металлургических заводах с идентичным химическим составом, зачастую разительно отличаются по микроструктуре степенью распределения и содержанием примесей, размерами и формой графитовых включений и т.п. Это происходит вследствие того, что выплавленному чугуну передаются наследственные свойства переплавленного металла. Зачастую, это становится одной из причин брака. Перегрев расплава при выплавке способствует подавлению наследственных свойств чугуна, однако на практике многие предприятия ограничены в создании условий перегрева, для выполнения которых необходимы дополнительные мощности, повышенная энергоемкость готовой продукции, снижение стойкости оборудования. «Неблагоприятная наследственность» особенно часто сказывается при выплавке серого чугуна в вагранках, так как крупные включения графита и спель не успевают полностью раствориться в металле и переходят в отливки. Все физико-механические свойства вновь выплавленного металла при этом ухудшаются. Нужно

отметить, что основную роль в этом играет повышенное содержание свободного «не связанного» углерода, а не общая массовая доля углерода в металле, что довольно характерно для переплавленного чугуна.

Передельный или синтетический чугун [76] отличается от переплавленного повышенным содержанием связанного углерода, свободный углерод в незначительном количестве равномерно распределен и выделяется в структуре в форме мелких включений графита. Соответственно, распределение углерода в синтетическом чугуне положительно влияет на качество отливок доменного чугуна, так как он имеет благоприятные наследственные свойства. При использовании передельного чугуна в выплавке повышается жидкотекучесть металла и снижается его газосодержание. Тем не менее, в связи с высокой склонностью такого чугуна к «отбелу», рекомендуется его применение в качестве добавки для модификации литейного чугуна. Это тем более актуально, если учитывать тот факт, что при получении синтетического чугуна расход кокса по сравнению выплавкой литейного чугуна снижается на 20-30 %, при этом выход металла доменных печей повышается на 20-26 %. Замечено, также, что герметичность синтетического чугуна выше, чем у обычного.

Неоднократные исследования показывают, что разброс значений механической прочности образцов одной заливки для синтетических чугунов ниже, чем для обычного чугуна, что подтверждает более высокую однородность металла.

Особенностью передельного чугуна является, также, пониженное содержание фосфора и серы, поэтому синтетический чугун имеет более высокую пластичность и вязкость, особенно в области низких температур. Низкое содержание серы зачастую сопровождается избытком Mn, а также, вследствие использования стального лома, можно наблюдать повышенную концентрацию Cr. Поэтому при производстве синтетического чугуна рекомендуется увеличение длительности отжига, в особенности его II стадии.

Таким образом, передельный чугун следует применять для получения высококачественного сплава, особенно если речь идет о марках с шаровидным графитом. На практике в настоящее время из синтетического чугуна выполняют ответственные изделия такие, как фрикционы, коленчатые валы, головки двигателей внутреннего сгорания, арматуры для работы при высоких давлениях и температурах и т.п.

Следующим аргументом в пользу применения синтетического чугуна является то, что при его выплавке используются стальной лом, листовая обрезь, стружка и другие дешевые низкосортные металлоотходы, что снижает себестоимость на 25 - 30 % по сравнению с обычным литейным чугуном. Другое, не менее важное достоинство применения выплавки передельного чугуна - это возможность переработки в литейных цехах непосредственно на месте образования отходов, исключая образование безвозвратных потерь и транспортировку. [76]

1.8.2 Особенности выплавки синтетических чугунов

В производстве синтетических чугунов ключевое место занимает процесс науглероживания. С этой целью применяются как углеродистые, так и углеродсодержащие вещества – это древесный уголь, графит, антрацит, каменноугольные коксы и т.п. В работе проведен сравнительный анализ эффективности взаимодействия расплава с углеродистыми материалами с точки зрения особенностей фазового состава и микроструктуры готовой отливки. Свойства некоторых материалов, используемых для науглероживания, их усваиваемость расплавом при определенных температурных условиях представлены в таблице 1.2

Отечественными учеными показано [77], что степень усвоения углерода расплавом повышается с увеличением чистоты химического состава науглероживания реагента. На степень усвоения углерода может влиять зольность науглероживателя путем изменения скорости молекулярной диффузии в процессе плавки. Показано на примере антрацита, в котором

зольные примеси в основном находятся в виде прослоек в межкристаллитном пространстве, уменьшают прочность связи кристаллитов между собой. Сначала с расплавом реагируют минеральные примеси, поэтому процесс науглероживания смещается по времени. Помимо этого, примеси могут вступать в химическую реакцию и входить в структуру кристаллитов. Такими элементами являются сера, азот, водород, кислород. Содержание и состав золы в науглероживающем материале зависит ряда факторов, связанных с фракционным составом, температурными условиями обработки, месторождением, строением материала и т.п. То есть для получения стабильных результатов требуется предварительная специально подобранная обработка науглероживателя. Углеродные материалы, прошедшие процесс графитизации или высокотемпературной обработки являются наиболее чистыми от примесей. Так, графитация материала с золоностью 5-8 % при температурах порядка 2500 °С позволяет снизить ее до 1,0-1,5 %. Другой плюс такой операции заключается в том, что при графитации происходит переход структуры в совершенную графитовую решетку или близкую к ней. Это с очевидностью наблюдается исходя из данных таблицы 1.2: скорость науглероживания повышается с увеличением степени совершенства структуры и размера кристаллитов источника науглероживания.

Таблица 1.2 - Особенности науглероживания при получении синтетического чугуна

Науглероживатель	Содержание, %			Параметры усвоения «С»			
	С	V	Зола	T _{расплава} , °С	τ _{наугл} , мин	Усвоение С, %	Скорость усвоения С, % С/мин
Уголь донецкий	67,8	30,6	18,6	1510	24	60	0,063
Древесный уголь	91,8	7	1,2	1500	27	60	0,08
Кокс каменноугольный	86,5	1,8	11,7	1530	23	75	0,08
Кокс сланцевый	90,8	6,2	3,0	1510	22	80	0,086
Термоантрацит кусковой	89,6	1,6	8,8	1540	30	78	0,067
Отсев	87,9	2,5	9,6	1520	26	76	0,073
Графит естественный	89,7	1,8	8,5	1530	23	77	0,083
Электродный бой 1	94,0	3,2	2,8	1520	19	90	0,100
Электродный бой 2	98,8	-	1,2	1530	22	95,1	0,132

Таким образом, при выборе источника углерода необходим анализ элементного состава золы и структуры науглероживания, на основе которых проводить анализ и выбор технологического режима науглероживания при плавке. [76]

Структурообразование чугуна значительным образом связано со скоростью охлаждения отливки, определяющейся главным образом размером отливки: чем больше толщина стенок отливки, тем меньше скорость охлаждения. Соответственно, при повышении скорости охлаждения отливки содержание цементита в микроструктуре чугуна увеличивается, а при снижении скорости охлаждения повышается количество графита. В связи с этим очень часто отливка с разной толщиной стенок при одном и том же химическом составе может иметь разную микроструктуру.

При температурах выше 1400 °С в передельном чугуне, так же как и в литейном, наблюдается активный рост дисперсности перлита. Вместе с тем, этот процесс в синтетическом чугуне происходит более активно. Более того, наблюдается повышение однородности перлита по сечению образцов. Это свойство синтетического чугуна успешно применяется на практике для улучшения его качества, при этом замечено, что влияние перегрева проявляется заметнее при использовании чистых шихтовых материалов и меньшей степени эвтектичности.

Для повышения механических свойств синтетического чугуна важное влияние оказывает термовременная обработка жидкого металла. Для доэвтектических синтетических чугунов принята оптимальной температура 1500 – 1550 °С, вместе с тем, замечено, что длительная выдержка металла в печи при этих температурах снижает прочность чугуна. [73]

На рисунке 1.12 показано влияние кремния на удельную производительность и удельный расход кокса доменных печей, полученные в НПО «Тулачермет».

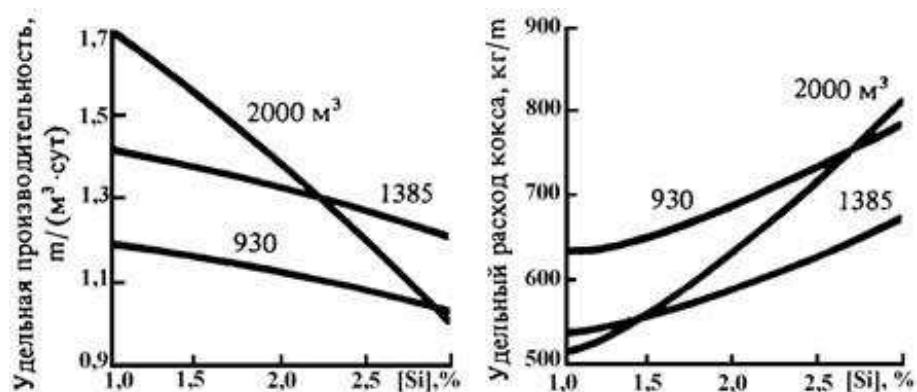


Рисунок 1.12 – влияние содержания кремния в чугуна на удельную производительность и удельный расход кокса доменных печей (числа у кривых – объемы доменных печей, м³)

В настоящее время в России накоплен довольно большой опыт производства передельного чугуна. Присадку ферросилиция можно проводить как в поток чугуна на желоб доменной печи, так и непосредственно в чугуновозный ковш. Тем не менее, для наиболее полного растворения ферросилиция до 85-90 % необходимо соблюдение определенных условий. Например, на Магнитогорском металлургическом комбинате ферросилиций ФС75 с размером кусков 50-80 мм перед загрузкой в ковш прогревают в контейнерах коксовым газом. Существует, также, опыт подачи в ковш жидкого ферросилиция. Данные методы имеют определенный набор недостатков организационно-технологического характера, поэтому на практике широкого распространения не получили.

На металлургическом предприятии НПО «Тулачермет» освоены методы, способствующие наиболее полному растворению ферросилиция. Для этого ФС45 и ФС75 добавляют в струю чугуна на желобе доменной печи определенными строго нормированными дозами. Определены технологические параметры, способствующие растворению до 95% ферросилиция: фракция ФС45 и ФС75 должна составлять размер порядка 30 мм, температура выплавки чугуна должна быть около 1550 °С. Однако недостаток данного метода заключается в неоднородности распределения кремния в готовых слитках, составляющая от 0,2 до 0,3 %.

Рассматривая приведенные данные, можно отметить, что эффект максимально растворения ферросилиция в чугуна достигается двумя главными параметрами. Во первых, наличие при выплавке положительного теплового баланса для обеспечения процесса расплавления вводимого ферросилиция. Во вторых - активация растворения ферросилиция путем интенсификации процессов массо - и теплообмена за счет принудительного перемешивания.

На рисунке 1.12 приведена диаграмма изменения температуры чугуна при растворении ферросилиция непосредственно в ковше, построенная на основании теплового баланса. Принято, что ферросилиций вводится в ковш после слива чугуна, а растворяется после заполнения ковша в условиях интенсивного перемешивания. Допущено, что за счет энтальпии футеровки ковша (тепла от предыдущей плавки) ферросилиций перед заливкой прогревается до 500 °С, а перед перемешиванием чугун и ферросилиций выдерживаются в ковше 80-90 мин н).

Из диаграммы следует, что наиболее благоприятные условия для расплавления ферросилиция создаются при использовании ФС65, так как у него наименьшая температура плавления.

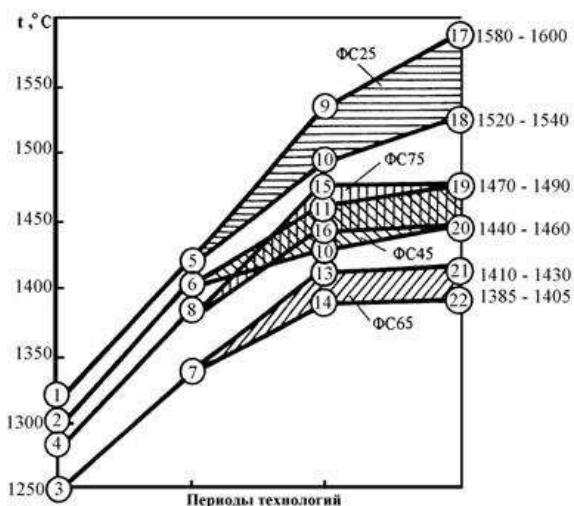


Рисунок 1.13 – Диаграмма изменения температуры чугуна в ковше: 1 - 4 – температура плавления ферросилиция; 5 - 8 – температура в ковше после выпуска из доменной печи; 9 - 16 – температура в период нагрева и расплавления ферросилиция; 17 - 22 – требуемая температура на выпуске из доменной печи; точки 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21 соответствуют повышению содержания кремния в чугуна на 1 %; точки 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 соответствуют повышению содержания кремния в чугуна на 2,5 % [76].

Используя пульсационное перемешивание, можно повысить усвоение крупных кусков ферросилиция до 93-94 %, исключив при этом из технологического передела операцию дробления ферросилиция. Как известно, при использовании ферросилиция в состоянии поставки (размеры кусков 300-350 мм), степень его усвоения на 20-25 % меньше чем при использовании дробленых кусков из-за частичного всплытия больших кусков в шлак. Это становится возможным погружением пульсационной колонны в верхние слои ванны и их перемешиванием во второй половине временной обработки.

Также исследованы предпосылки снижения содержания серы слитковым магнием в ковше (рисунок 1.13).

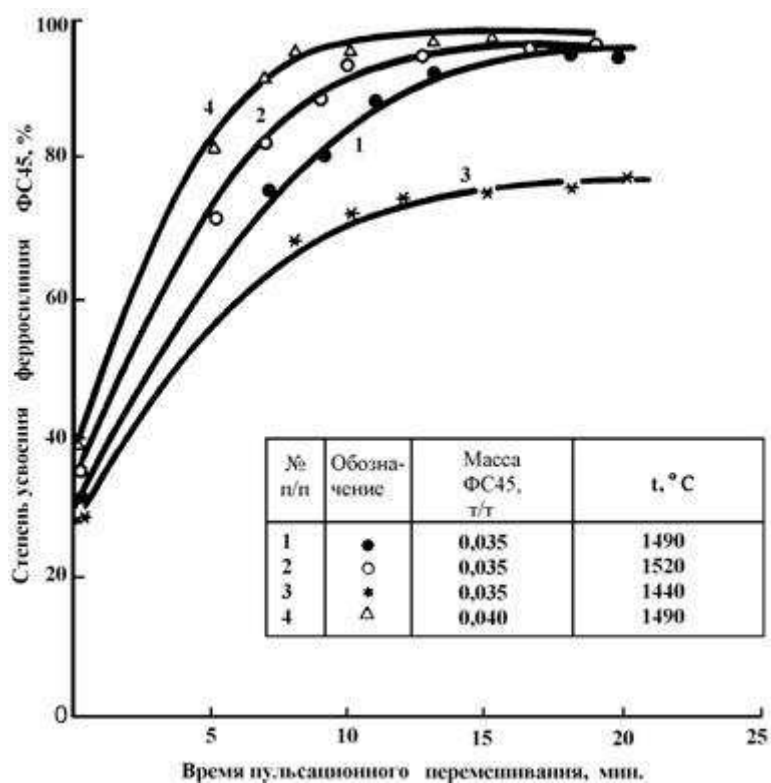


Рисунок 1.13 - Степень усвоения дробленого ферросилиция ФС45 для разных температур чугуна и длительностей пульсационной обработки

С позиции снижения времени обработки наиболее технологичным является поочередная обработка ферросилицем, а затем магнием. При таком варианте время пульсационного перемешивания может быть снижено до 7-10 мин, так как на последующих операциях будет проводиться интенсивное перемешивание при проведении десульфурации. Как известно, применение

магния при избавлении от серы в случае синтетического чугуна на столько же эффективно, как при производстве обычного чугуна. Это связано с тем, что температура обработки синтетического даже чуть ниже температуры переделки литейного чугуна. Достоинством способа пульсационного перемешивания при производстве синтетического литейного чугуна является получение высокой химической однородности как в макро-, так и в микромасштабах литейного изделия.

Для подбора наиболее рационального способа обработки чугуна важное место занимает механизм и кинетика растворения вводимого материала в жидком чугуне. Для описания механизма взаимодействия вводимые для обработки чугуна материалы подразделяют на легкоплавкие ($T_{II} < T_K$), тугоплавкие ($T_K < T_{II} < T_{Ч}$) и сверхтугоплавкие ($T_{II} > T_{Ч}$), где T_{II} - температура плавления вводимого материала, T_K - температура кристаллизации чугуна, $T_{Ч}$ - температура чугуна в ковше. В соответствии с таким, довольно условным разделением, можно описать кинетику растворения в чугуне вводимого материала (рисунок 1.14). Например, растворение легкоплавкого ферросплава можно разделить на три стадии. На первой стадии ферросплав прогревается до T_{II} , и на его поверхности «нарастает» твердая корка чугуна.

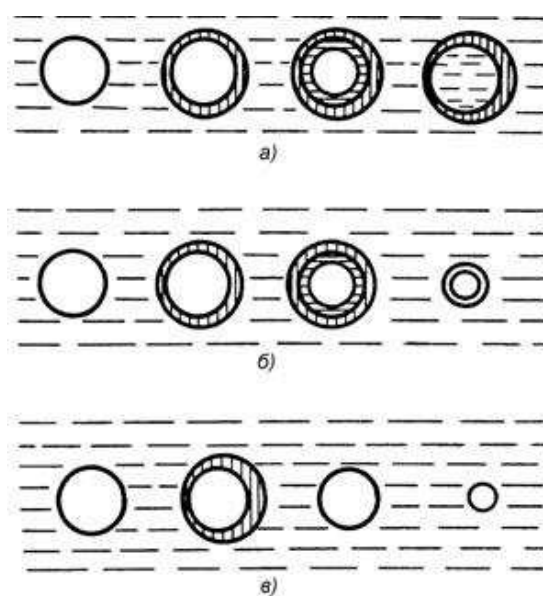


Рисунок 1.14 – Схематическое представление кинетики расплавления легкоплавкого (а, б) и тугоплавкого (в) ферросплава в чугуне

Во время второй стадии наблюдается плавление ферросплава под коркой. Данная стадия завершается или полным растворением ферросплава, или расплавлением твердой оболочки, при этом нерасплавившаяся часть ферросплава погружается в жидкий металл - все зависит от конкретных условий (значения теплового потока и теплопроводности самого ферросплава). Заканчивается процесс растворением твердой оболочки или растворением вводимого материала. Жидкая фаза ферросплава под твердой оболочкой может привести к образованию трещин, нарушению оболочки, вытеканию ферросплава и, в конечном итоге, растворению. Растворение тугоплавкого ферросплава делится на следующие три стадии: на первой стадии металл «намерзает» на ферросплав, на второй стадии ферросплав разогревается до температуры своего плавления, при этом корка плавится, происходит плавление и растворение ферросплава в металле происходит на третьей стадии.

При рассмотрении кинетики растворения согласно такой классификации, основная часть марок ферросплава представляются тугоплавкими по отношению к чугуну. Поэтому необходима коррекция способов введения ферросплавов. В качестве такой коррекции может выступать создание условий для принудительного смешивания или применения модификатора из частиц специальной геометрической формы, например ферросплав пластинчатой формы.

Анализ приведенных данных, показывает, что в доменные цеха металлургических заводов имеют большие возможности по доведению синтетического до уровня высококачественного литейного чугуна [67-78].

Количество угара сплава зависит от содержания шихты и степени ее окисленности, метода введения ферросплавов и углеродистого материала, температуры проведения процесса и времени выдержки. Практика показывает, что получение синтетического чугуна из стальной стружки сопровождается меньшим угаром, чем выплавка из чугуновой стружки в 2-2,5 раза. В связи с тем, что любая стружка отличается определенной степенью загрязнения, угар при получении синтетического чугуна подразделяется на весовой и истинный.

Чтобы определить количество истинного угара собирается и взвешивается весь образующийся шлак. По результатам анализа химического состав шлака рассчитывают содержание окислов таких элементов как железо, магний, хром и кремний, а остаток взвеси определяют как на засоренность шихты. Таким методом установлено, что истинный угар при выплавке стальной стружки может быть от 0,3 до 6,2 %, а при выплавке чугуна достигает 5,3-9 %. Это объясняется большей удельной поверхностью чугунной стружки и засоренностью ее окислами.

Степень и скорость усвоения ферросплавов и углерода и скорость образования угара, зависят технологических режимов при проведении процесса - способа введения, фракционного состава, структуры компонентов шихты, температуры нагрева, времени выдержки металла. Например, при использовании в качестве источника углерода кусков боя графитовых электродов размером более 40мм, углерод усваивается на 20-25 % меньше.

Замечено, что кремний выгорает при температурах 1420-1450 °С, при дальнейшем повышении температуры до 1500 °С происходит восстановление кремния углеродом, при 1500-1550 °С происходит образование окиси углерода. При добавлении Si в малоуглеродистый чугун нужно учитывать, что угар может достигать до 25 %, снизить который до 14 % можно введением ферросилиция.

Угар марганца в большинстве случаев не выше 18 % и определяется методом введения ферромарганца, при этом практически не зависит от температуры нагрева и времени выдержки.

В выплавленном из стальной стружки чугуне среднее содержание серы составляет не более 0,03 %, максимальное - 0,055 %. При переплавке чугунной стружки содержание серы в чугуне несколько выше, но в процессе выплавки уменьшается – так при содержании серы в чугунной стружке в количестве 0,093 % S после выплавки уменьшается до содержания 0,07 %.

Количество фосфора в чугунах из стальной стружки довольно низкое, но выше, чем в самой стружке, так как при нагреве происходит восстановление фосфора углеродом из окислов.

Графитовые включения в структуре чугунов из стальной стружки могут быть крупными, компактными и изолированными или в виде длинных несколько завихренных пластин. Включения графита в чугунах из чугунной стружки принимают вид мелких и средних пластинок, сильно завихренных и пересекающиеся между собой, поэтому механические свойства у чугунов, полученных из стальной стружки выше, чем, у чугунов из чугунной стружки.

При перегреве твёрдость синтетических чугунов понижается, прочность при изгибе - повышается, при этом значение временного сопротивления разрыву остается неизменным. Это вызвано снижением общего содержания газов, в особенности азота, в металле и неметаллических включений. Чугуны, выплавленные из стальной стружки, отличаются несколько повышенным содержанием азота, по сравнению с чугунами из чугунной стружки. Это связано с тем, что изначально в стальной стружке больше азота, чем в чугунной, а при выплавке чугуна из стальной стружки в шихту добавляется значительно больше ферросплава.

Содержание кислорода в составе не зависит от вида стружки и способа получения и в среднем одинаково как для синтетических, так и литейных чугунов. [67-79]

1.8.3 Выплавка синтетического чугуна в индукционной печи

Наиболее целесообразно как с экономической точки зрения, так и с точки зрения технического воплощения, использовать индукционные электропечи для производства синтетического чугуна. В высшей степени ответственный этап при плавке передельного чугуна в индукционной печи - это процесс насыщения металла углеродом, способы введения источника углерода при этом могут быть разные. Например, способ введения науглероживающего компонента непосредственно в шихту, характерен для американских

производителей. При использовании в качестве источника углерода кокса, его можно вводить и в шихту, и в расплавленный металл. При использовании кокса степень усвоения углерода может быть ниже заданного, в таком случае в расплав дополнительно вводится графит. Для дополнительного науглероживания используют, также, пылевидный графит, добавляя его в струю газа и продувая зеркало металла. Практикуется, также, введение углеродосодержащих компонентов в специальный встряхивающий ковш. Нужно иметь в виду, что углерод растворяется с поглощением тепла, в связи с этим нужно поддерживать температуру сплава. Например, замечено, что при усвоении 1 % углерода температура расплава снижается примерно на 50 °С. При введении науглероживателя на ванну жидкого металла, необходимо предварительно освободить зеркало расплава от шлака.

Установлено, что усвоению углерода способствует электромагнитное перемешивание жидкого сплава в электропечах промышленной частоты.

После науглероживания металла до заданного уровня, проводят регулирование кремния до требуемого содержания.

Таким образом, при надлежащем уровне отслеживания технологического процесса можно получить стабильный состав чугуна с регламентированным химическим составом [79].

1.9 Выводы к главе 1

1. За период существования алюминиевой отрасли конструкция электролизеров претерпела существенные изменения, оставляя неизменным принципиальную схему получения алюминия – электролитическое разложение глинозема, расплавленного в криолите с помощью анодных стержней и катодной установки. Критическим вопросом алюминиевой отрасли был и остается вопрос стойкости алюминиевых электролизеров.

2. Существует ряд причин преждевременного выхода из строя алюминиевых электролизеров, тем не менее, основной вопрос остается в повышении стойкости футеровки катодных устройств.

3. Основная причина разрушения катодной футеровки – проникновение парообразного натрия в межслойные промежутки угольных катодных блоков, в результате чего происходит образование трещин, разбухание и деформация подины, вызывающие, в свою очередь, деформацию катодного кожуха.

4. Образование микротрещин в период монтажа и пуска электролизера усугубляют проникновение натрия и существенно снижают срок эксплуатации электролизерных установок, поэтому крайне важное значение имеет проведение мероприятий способствующих снижению трещинообразования в период монтажно-пусковых работ.

5. Большое значение с точки зрения экономии электроэнергии имеет метод заделки зазоров между катодным стержнем и подовым блоком посредством заливки чугуна, существенно снижающим падение электрического сопротивления в катодной установке.

6. При заливке чугуном подовые секции подвергаются значительным термическим напряжениям, следствием которых является образование трещин и деформация блоков. Исключение данного явления возможно путем нагрева блюмсов и подовых блоков непосредственно перед заливкой чугуна до температуры 300-1000 °С.

7. Сочетание низкой себестоимости и высокого качества синтетического чугуна, зачастую превышающего по прочностным характеристикам и пластичности литейный, создают ему преимущества при использовании в заделке контакта «подовый блок - блюмс».

8. Синтетический чугун более приспособлен для выплавки в индукционной печи, тем не менее, для исключения отбела синтетический чугун необходимо модифицировать литейным.

[изъято 31 страница]

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

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель магистерской
Программы

 Н.В. Белоусова
подпись инициалы, фамилия

« 13 » 07 20 20 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Совершенствование технологии заливки чугуном

катодных подовых секций

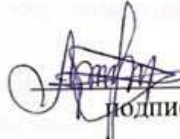
тема

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

код и наименование магистерской программы

Руководитель:


канд.техн.наук, доцент
каф. МЦМ ИЦМиМ

 10.07.2020 г.
подпись, дата

А.С. Ясинский
инициалы, фамилия

Консультант:

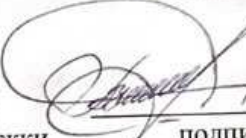
канд.эконом.наук, доцент
каф. МЦМ ИЦМиМ

 10.07.2020 г.
подпись, дата

Т.В. Твердохлебова
инициалы, фамилия

Студент:


ЦМ 18-29 М, 061837004
номер группы, зачетной книжки

 10.07.2020 г.
подпись, дата

В.С. Аптикеев
инициалы, фамилия

Рецензент:

Менеджер ОП ООО ИТЦ

 10.07.2020 г.
подпись, дата

А.И. Лихомысля
инициалы, фамилия

Красноярск 2020