

На правах рукописи



ПАРТЫКО Евгений Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ДЕГАЗАЦИИ ПРИ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ**

Специальность 2.6.3 – Литейное производство
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель:

Кандидат технических наук, доцент **Баранов Владимир Николаевич**

Официальные оппоненты:

Ри Эрнст Хосенович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Литейное производство и технологии металлов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тихоокеанский государственный университет»;

Бродова Ирина Григорьевна, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории цветных сплавов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук»;

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Защита состоится 14 апреля 2023 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.404.01 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfukras.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Лесив Елена Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из крупнейших мировых производителей алюминия, является Российская компания ОК РУСАЛ, целью которой является увеличение продаж продукции с добавленной стоимостью (ПДС) и в среднесрочной перспективе планирует увеличение данной продукции до 60 % и выше от общего объема выпуска. Предъявляемые повышенные требования к качеству слитков, их технологическим и эксплуатационным свойствам в значительной мере зависят от содержания в структуре неметаллических включений (оксида алюминия) и водорода. Существующие технологии литейного производства не обеспечивают стабильного получения содержания водорода в расплаве алюминия менее $0,1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, что отрицательно сказывается на конкурентоспособности продукции. Поэтому разработка научно-обоснованных технических и технологических решений, направленных на снижение содержания водорода в слитках из алюминия и алюминиевых сплавов, является актуальной научно-технической проблемой.

Данная работа выполнялась в соответствии Федеральной программой «Стратегия развития цветной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года», разработанной по поручению Правительства Российской Федерации от 16 июля 2013 г. № ДМ-П9-53пр в рамках проекта 14.578.21.0193 «Разработка теоретических и технологических решений снижения водорода в составе алюминия и низколегированных алюминиевых сплавов» Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57816X0193, а также по договору с ОК «РУСАЛ»

Степень разработанности темы: Благодаря исследованиям таких известных ученых, как В.К. Афанасьев, М.Б. Альтман, Г.Ф. Баландин, А.И. Батышев, К.А. Батышев, А.Ф. Белов, В.Д. Белов, Н.А. Белов, А.И. Беляев, Б.И. Бондарев, С.В. Беляев, А.А. Бочвар, И.Г. Бродова, А.И. Вейник, С.М. Воронцов, Б.Б. Гуляев, В.Б. Деев, В.И. Добаткин, В.И. Елагин, В.М. Замятин, Е.Д. Захаров, В.В. Захаров, В.С. Золоторевский, В.А. Кечин, Г.Г. Крушенко, В.А. Ливанов, Д.П. Ловцов, М.В. Мальцев, Р.К. Мысик, В.И. Напалков, В.И. Никитин, К.В. Никитин, И.И. Новиков, М.В. Пикунов, А.Н. Прудников, Ри Хосен, Э.Х. Ри, И.Ф. Селянин, А.Н. Соколов, А.Г. Спасский, И.Н. Фридляндер, Д.Ф. Чернега, Г.И. Эскин, Д.Г. Эскин и др. разработаны научные основы плавки и кристаллизации цветных металлов и сплавов, внесен существенный вклад в дальнейшее развитие теории и технологии литейного производства, что явилось научной базой при проведении исследований в настоящей работе для обоснования и дальнейшего совершенствования технологии плавки и заготовительного литья из алюминиевых сплавов .

Однако задача повышения эффективности рафинирования алюминиевых сплавов от водорода и его соединений остается актуальной и требует проведения дополнительных исследований в данном направлении.

Объектом исследований в настоящей работе являются алюминий и его сплавы, технологические процессы и оборудование, используемое при заготовительном литье.

Целью диссертационной работы является разработка технических и технологических решений для совершенствования процесса дегазации при заготовительном литье алюминия и его сплавов.

Для достижения данной **поставленной цели были сформулированы задачи:**

1) проанализировать современные методы и приборы для рафинирования и дегазации алюминиевого расплава и определения содержания водорода в алюминиевом расплаве и слитках;

2) исследовать условия и динамику насыщения алюминиевого расплава водородом в аппаратурно-технологической схеме от алюминиевого электролизера до литейной машины или литейного конвейера в условиях действующего производства на ОК РУСАЛ;

3) провести модернизацию экспериментальных методов и средств для научно-обоснованного отбора проб и последующего достоверного и оперативного определения концентрации водорода в алюминиевом расплаве;

4) с учетом промышленных условий предприятий ОК РУСАЛ разработать и апробировать эффективную технологию производства заготовительного литья алюминия и его сплавов, которая гарантирует содержание водорода менее $0,10 \text{ см}^3/100 \text{ г Al}$.

В работе получены следующие результаты, отличающиеся **научной новизной**.

1. Установлено влияние легирующих добавок и флюсов на насыщение алюминиевых расплавов водородом, заключающееся в увеличении концентрации водорода в расплаве алюминия при вводе Si в количестве 7 % на $0,072 \text{ см}^3/100 \text{ г Al}$, при вводе лигатуры Al-Ti в количестве 0,1% на $0,038 \text{ см}^3/100 \text{ г Al}$, при вводе лигатуры Mn-Flux в количестве 0,03% на $0,072 \text{ см}^3/100 \text{ г Al}$, при вводе лигатуры Fe-Flux в количестве 0,1 % на $0,04 \text{ см}^3/100 \text{ г Al}$, при вводе Mg в количестве 0,3 % на $0,146 \text{ см}^3/100 \text{ г Al}$, при вводе лигатуры Al-Sr в количестве 0,02 % на $0,018 \text{ см}^3/100 \text{ г Al}$, при вводе лигатуры Al-5Ti-1B в количестве 1,5 кг/т на $0,075 \text{ см}^3/100 \text{ г Al}$, при вводе Cu в количестве 1 % на $0,008 \text{ см}^3/100 \text{ г Al}$.

2. Получены зависимости влияния размера дендритной ячейки на изменение концентрации различных видов водородных включений в алюминиевых сплавах. Так при среднем размере дендритной ячейки в кристаллизованном алюминии более 45 мкм водород выделяется в молекулярном состоянии, а при среднем размере дендритной ячейки менее 30 мкм водород выделяется в атомарном состоянии.

3. Впервые проведены сравнительные исследования концентрации и различных видов водородных включений на коррозионные процессы в алюминии и его сплавах и установлено, что водород выделившейся в молекулярной форме увеличивает глубину распространения коррозии на 200 %, по сравнению с водородом присутствующем в атомарном состоянии.

4. Впервые установлено влияние концентрации и различных видов водородных включений на механические свойства алюминия и его сплавов. Увеличение концентрации водорода с 0,08 до 0,22 см³/100 г Al в образцах с атомарной формой водородных включений практически не оказывает влияние на механические свойства алюминия. Присутствие водорода в молекулярной форме в концентрации от 0,08 до 0,22 см³/100 г Al резко снижает относительное удлинение с 12 % до 6% и временное сопротивление разрыву с 200 МПа до 175 МПа отливок из алюминиевых сплавов.

Практическая значимость работы:

1) Создана методика определения содержания водорода обеспечивающая повышение оперативности и точности пробоотбора, оригинальность которой подтверждена патентом РФ 2651031 «способ отбора пробы жидкого металла».

2) Разработаны и реализованы новые устройства для отбора проб жидкого металла, техническая новизна которых подтверждена патентами РФ:

- устройство для отбора пробы жидкого металла, патент РФ на полезную модель 174042;

- устройство для отбора пробы жидкого металла из металлотракта, патент РФ на полезную модель 175093.

3) Разработаны и реализованы новые технологии:

- технологическое решение для «закрытого» перелива расплава из электролизера в ВТК с использованием сифона, новизна подтверждена патентом РФ № 2659556;

- технологическое решение для «закрытого» перелива металла при выливке из электролизеров и последующей заливки расплава в миксер снижающие насыщение алюминия водородом примерно на 40 % (с 0,049 до 0,029 см³/100 г Al), новизна подтверждена патентом РФ № 2668640,

4) Разработан новый технологический регламент для производства литейных сплавов в виде малогабаритной чушки на линии «Brochot» обеспечивающие концентрацию водорода менее 0,1 см³/100 г Al, что подтверждается соответствующим актом опытно-промышленных испытаний и отражено в разработанном 2ТР 501.02.01.02 (Ред.1) Технология производства малогабаритной чушки из литейного сплава на линии «Brochot» в ЛО-1 с содержанием H₂ до 0,1 см³/100 г Al.

5) Результаты исследований внедрены в учебный процесс и используются при обучении магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и магистерской программе 22.04.02.07 «Теория и технология литейного произ-

водства цветных металлов и сплавов» и аспирантов по специальности 05.16.04 (2.6.3) «Литейное производство».

Реализация результатов работы.

Результаты работы внедрены на предприятиях ОК РУСАЛ.

Методология и методы исследований, используемые в настоящей работе, основаны на основных законах термодинамики, теории литейных процессов и кристаллизации, с применением современных методик и методов исследований: методов планирования эксперимента и статистического анализа данных, оптической микроскопии, рентгенофазовый анализ, термодинамический анализ, методы определения механических свойств путем испытаний на растяжение и др.

На защиту выносятся следующие положения:

- 1) Результаты экспериментальных исследований интенсивности насыщения алюминия водородом на различных участках аппаратурно-технологической схемы заготовительного литья алюминия и его сплавов;
- 2) Экспериментальные закономерности влияния концентрации и различных видов водородных включений на коррозионные процессы алюминия;
- 3) Экспериментальные закономерности влияния концентрации и различных видов водородных включений на механические свойства алюминия;
- 4) Новые технические и технологические решения производства слитков из алюминия и алюминиевых сплавов, гарантирующих получение продукции с содержанием водорода менее $0,10 \text{ см}^3/100 \text{ г Al}$.

Личный вклад автора заключается в планировании экспериментов, выборе методик исследований, их реализации в лабораторных условиях ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и проведении опытно-промышленных испытаний в производственных условиях на заводах ОК РУСАЛ, в обобщении и научном обосновании результатов и в формулировании выводов, обработки результатов экспериментов, подготовке научных статей и патентов. Настоящая работа является продолжением научно-исследовательских работ, выполняемых на кафедре «Литейное производство» Института цветных металлов и материаловедения СФУ в рамках научно-исследовательских работ с ОК «РУСАЛ». Включенные в диссертацию и выносимые на защиту результаты настоящей работы представляют собой часть общих результатов научно-исследовательских работ по рассматриваемой проблеме, которые были выполнены автором с соавторами за годы совместной работы и были получены непосредственно автором или при его ведущем участии.

Степень достоверности научных положений и полученных результатов обоснована:

– применением современных методов исследований алюминиевых сплавов, математического моделирования и обработки полученных результатов;

- соответствием результатов исследований, полученных автором, с результатами других исследований в этой области;
- практической реализацией полученных результатов.

Текст диссертации и автореферата проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат. РГБ».

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на IX, X Международных конгрессах «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2018-2020 гг.), Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в литейном производстве» (Москва, 2019 г.), X Международная научно-техническая конференция «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2020 года)

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 23 печатных трудах и тезисах докладов, из них 11 из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, 7 в базе данных Scopus и в 5 патентах РФ.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.6.3 - Литейное производство (технические науки): 4) Исследование литейных технологий для их обоснования и оптимизации; 13) Исследование проблем качества литья;

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 164 источника, и трех приложений. Основной материал изложен на 156 страницах, включая 16 таблиц, 14 формул и 88 рисунков.

Автор работы выражает благодарность за большую помощь при проведении данного исследования докт. техн. наук, профессору кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов», Дееву Владиславу Борисовичу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, представлены научная и практическая значимости диссертационной работы.

В первой главе проведен критический анализ современного уровня развития литейного производства и рассмотрены проблемы качества слитков из алюминиевых сплавов, связанные с пористостью и расслоениями, которые являются дефектами внутреннего строения слитка, образующиеся от водорода в алюминиевых слитках. Наличие водорода приводит к серьезному снижению механических и технологических свойств алюминиевого сплава, что обуславливает обязательный контроль его содержания в слитке.

Одним из крупнейших в мире производителем является Российская компания ОК РУСАЛ, которая интенсивно наращивает объемы выпуска продукции с добавленной стоимостью (ПДС) и активно развивает инновационные направления в литейном производстве. Одним из перспективных

направлений является производство слитков из алюминиевых сплавов для прокатного и прессового производства. Показано, что одним из главных требований, предъявляемым к крупнотоннажным слиткам является равномерная мелкозернистая структура по всему сечению и отсутствие дефектов в виде водородной пористости. Показано, что для получения качественной продукции из алюминиевых сплавов необходимо ограничить содержание водорода в расплаве не более $0,1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

Основным источником водорода в алюминиевых сплавах являются водяные пары, которые содержатся в атмосферной влаге, в шихтовых материалах и флюсах, в плавильной оснастке и др., с которыми жидкий металл взаимодействует на всех этапах получения отливки и при температуре свыше 300°C разлагает воду на водород, который активно растворяется в расплаве. Водород в твердом алюминии и его сплавах может находиться в алюминиевом твердом растворе, как правило, в сильно пересыщенном состоянии, растворяться в интерметаллидных фазах, сегрегировать на межфазных границах раздела и выделяться в форме пор, заполненных молекулярным водородом. Для улучшения качества и очистки алюминиевых расплавов от газообразных и твердых примесей используется печное и внепечное рафинирование, и наибольшее распространение в промышленности получили следующие методы дегазации: применение различных нейтральных и активных газов или газовых смесей; вакуумирование; использование флюсов; фильтрация; воздействие различными силовыми полями: гравитационными, электрическими, электро-магнитными, кавитационными, ультразвуковыми, которые по-разному влияют на загрязненность и дегазацию алюминиевого расплава.

На основании проведенного анализа сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Во второй главе представлены разработанные и усовершенствованные методики проведения исследований.

Объектом исследований были промышленные алюминиевые сплавы, химический состав которых соответствовал требованиям ГОСТ 4784-97.

Во время проведения исследований эксперименты проводились, как в лабораторных, так и в промышленных условиях. Опытные плавки проводились в литейном отделении на литейной машине действующего производства предприятия ОК РУСАЛ. Приготовление и литье алюминиевых сплавов производилось с обязательным применением установки рафинирования HD 2000 и дегазатора марки SNIF; фильтрация производилась через трубчатый металлофильтр марки Mitsui с картриджами R_c. Модифицирование проводилось прутковой лигатурой Al-Ti-B.

Макроструктуру образцов изучали с применением стереоскопического микроскопа Stemi 2000-C, Carl Zeiss. Количественную оценку микроструктуры проводили методом линейного анализа в программе для обработки цифровых изображений структур AxioVizion, Carl Zeiss. При определении размеров водородной и усадочной пористости использовали автоматизированную

систему анализа изображений «SIAMS Photolab». Исследования механических свойств проводились на установке WDW 10 и включали в себя стандартные испытания на растяжение при испытаниях на разрыв.

Разработана принципиально новая методика отбора пробы жидкого металла для анализа содержания в нем водорода. Методика упрощает отбор жидкого металла без искажения его состава за счет использования изложницы непосредственно в качестве пробоотборника. Это обеспечивает получение представительных проб металла, сокращает время пробоотбора, дает возможность отбирать пробы металла из металлургических емкостей с различной глубиной и расстоянием рис 1-2. (Патент РФ 2651031)

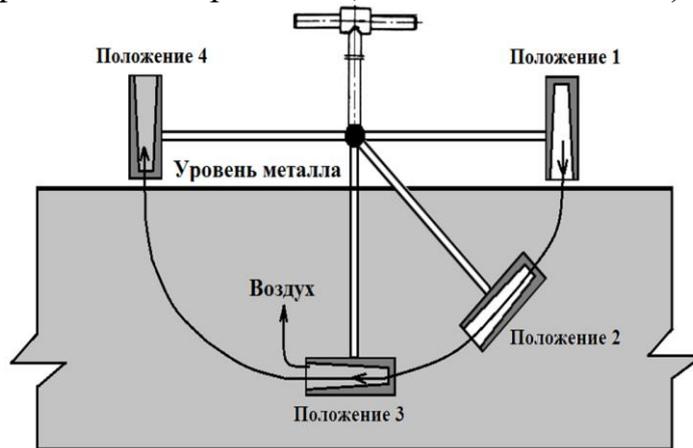


Рисунок 1– Методика отбора проб на содержание водорода в расплаве алюминия (Патент РФ 2651031)

В соответствии с разработанной методикой для отбора пробы используют неразъемную металлическую изложницу конической формы для пробы. Изложницу погружают в жидкий металл в перевернутом положении так, чтобы внутри нее оставался воздух, следующим шагом изложницу под углом погружают под зеркало металла для удаления из нее воздуха и заполняют расплавом, после чего извлекают из расплавленного металла и охлаждают до полной кристаллизации (рис 1).

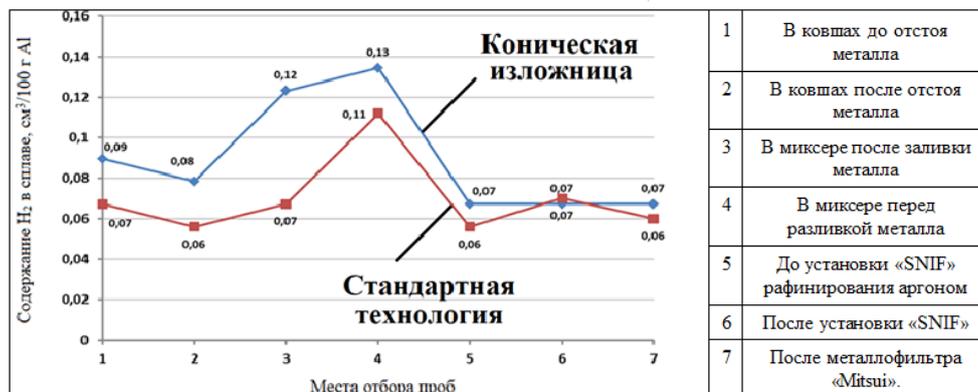


Рисунок 2– Измерение содержания водорода в алюминиевом расплаве: по стандартной технологии и с использованием конической изложницы - по патенту РФ 2651031

Разработанная методика отбора пробы жидкого металла для анализа на содержание водорода с использованием конической изложницы исключает субъективные факторы, влияющие на пробоотбор, обеспечивает получение представительных проб металла, сокращает время пробоотбора и позволяет получать более точные результаты.

В третьей главе представлены результаты исследований условий и динамики насыщения алюминиевого расплава водородом в технологической цепи от алюминиевого электролизера до литейной машины или литейного конвейера в условиях действующего производства на ОК РУСАЛ

Чтобы выявить «узкие» места в аппаратурно-технологической схеме (АТС) переработки алюминия-сырца, связанные с насыщением алюминия водородом, была проведена количественная оценка изменения содержания водорода в расплаве при его движении по технологической цепочке от алюминиевого электролизера до товарной продукции. Данная оценка позволила в дальнейшем разработать технические решения, направленные на снижение водородной экспансии в расплав.

АТС транспортировки, подготовки и разливки расплава в товарную продукцию на предприятиях ОК РУСАЛ включает следующие основные операции:

1) Выливание алюминия-сырца из электролизеров вакуум-транспортными ковшами (ВТК) со съемной крышкой.

2) Транспортировка расплава в ВТК из корпусов электролиза на участок удаления шлака с поверхности алюминия и отбор пробы металла на спектральный анализ.

3) Транспортировка расплава в литейный цех, технологический отстой в ВТК в течение 20÷40 мин. перед заливкой в миксер.

4) Заливка расплава из ВТК в миксер до его заполнения.

5) Введение и растворение в расплав легирующих и модифицирующих компонентов.

6) Обработка расплава в миксере рафинирующими и покровными флюсами; удаление шлака с поверхности расплава.

7) Технологический отстой расплава в миксере, отбор проб металла на экспресс-анализ, доведение температуры металла в миксере до регламентированных значений.

8) Разливка расплава из миксера в слитки или мелкую чушку, совмещенная с дегазацией и фильтрацией жидкого металла.

Принципиальная АТС представлена на рис. 3 с указанием мест отбора проб металла. На рис. 4 представлена динамика изменения концентрации водорода в жидком металле на основных этапах литейного передела изготовления слитков из алюминиевых сплавов.

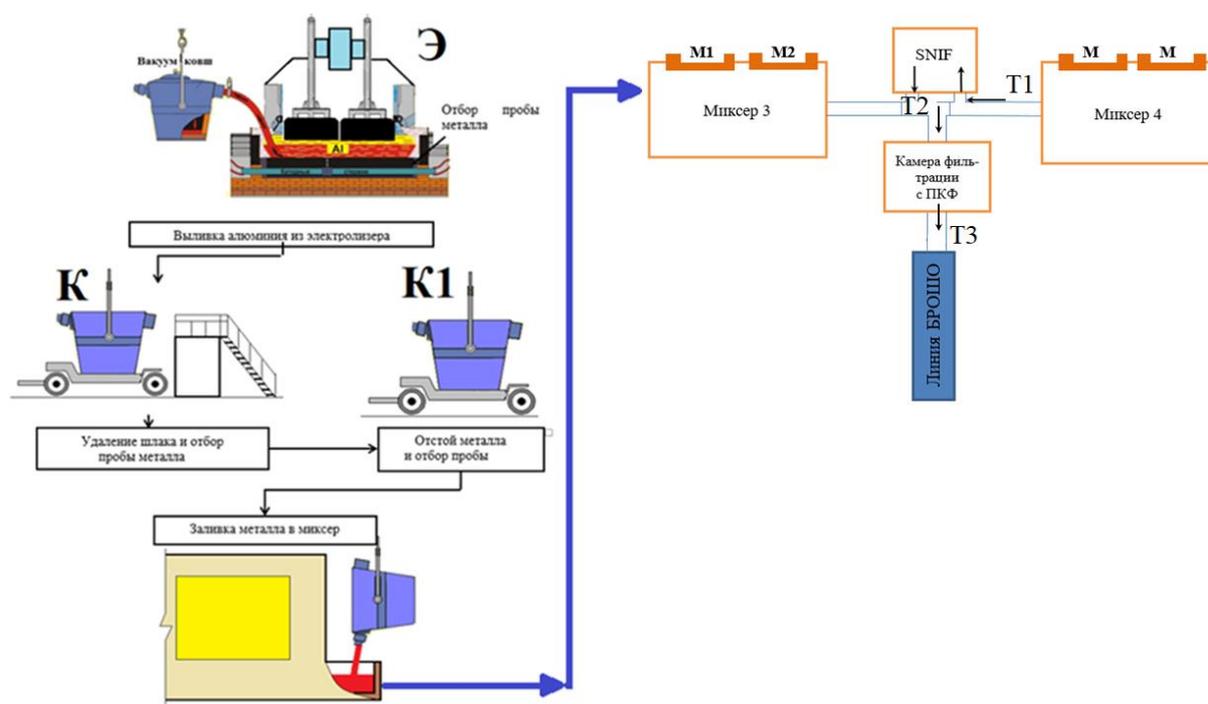


Рисунок 3 – Принципиальная схема АТС: буквами и цифрами на схеме указаны места отбора проб металла, стрелками - направление движения металла;



Рисунок 4 - Динамика изменения концентрации водорода в жидком металле на основных этапах литейного передела изготовления мелкой чушки из алюминиевых сплавов:

Э – электролизеры; К – ковши до отстоя металла; К1 – ковши после отстоя металла; М – миксеры после заливки металла; М1 – миксеры перед разливкой металла; Т1 – Т3 – точки отбора проб из литейных металлотракттов

Открытый перелив алюминия-сырца из электролизера в ВТК и из ВТК в миксеры (рис. 4) приводит к насыщению металла водородом в среднем на 0,049 и 0,083 см³/100г соответственно, вследствие эжекции пузырьков влажного воздуха в объем залитого металла. Дополнительное обогащение алюминиевого расплава водородом в АТС от алюминиевого электролизера до литейной машины происходит:

1) При вводе легирующих и модифицирующих, повышающих растворимость водорода при производстве алюминиевых сплавов (Табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительные результаты определения содержания водорода в алюминии различными методами при вводе легирующих и модифицирующих компонентов.

Добавка	До введения добавки		После введения добавки		Разница концентрации водорода, $\text{См}^3/100\text{г.}$		
	Экспресс метод (Alu Compact), $\text{См}^3/100\text{г.}$	Метод вакуум нагрева (АВ-1), $\text{См}^3/100\text{г.}$	Экспресс метод (Alu Compact), $\text{См}^3/100\text{г.}$	Метод вакуум нагрева (АВ-1), $\text{См}^3/100\text{г.}$			
Si (7 %)	0,190	0,200±0,010	0,154	0,240	0,250±0,021	0,226	+0,072
	0,200			0,270			
	0,210			0,230			
Al-Ti (0,1 %)	0,230	0,210±0,021	0,159	0,260	0,240±0,020	0,197	+0,038
	0,200			0,240			
	0,190			0,220			
Mn (0,03 %)	0,170	0,150±0,021	0,126	0,210	0,201±0,010	0,175	+0,049
	0,160			0,200			
	0,130			0,220			
Fe (0,1 %)	0,250	0,200±0,062	0,190	0,280	0,270±0,010	0,23	+0,04
	0,130			0,260			
	0,220			0,270			
Mg (0,3 %)	0,160	0,150±0,010	0,128	0,340	0,320±0,021	0,274	+0,146
	0,140			0,300			
	0,150			0,330			
Al-Sr (0,02%)	0,180	0,190±0,010	0,191	0,240	0,203±0,012	0,209	+0,018
	0,200			0,220			
	0,190			0,220			
Al-5Ti-1B	0,170	0,180±0,010	0,156	0,200	0,200±0,007	0,231	+0,075
	0,190			0,190			
	0,180			0,200			
Cu (1 %)	0,190	0,190±0,007	0,164	0,200	0,200±0,007	0,172	+0,008
	0,190			0,210			
	0,200			0,200			

2) при применении флюсовых препаратов, из-за наличия в них гигроскопической и кристаллизационной влаги; (Табл. 2).

Таблица 2 – Сравнительные результаты определения содержания водорода в алюминии различными методами при вводе флюсовых препаратов.

Добавка	До введения добавки		После введения добавки			Разница концентрации водорода, $\text{См}^3/100\text{г.}$	
	Экспресс метод (Alu Compact), $\text{См}^3/100\text{г.}$	Метод вакуум нагрева (АВ-1), $\text{См}^3/100\text{г.}$	Экспресс метод (Alu Compact), $\text{См}^3/100\text{г.}$	Метод вакуум нагрева (АВ-1), $\text{См}^3/100\text{г.}$			
Флюс Экораф-Ф5	0,22	0,19±0,031	0,164	0,38	0,38±0,010	0,272	+0,108
	0,20			0,37			
	0,16			0,39			
Флюс ФПР 23	0,21	0,21±0,007	0,117	0,21	0,22±0,012	0,121	+0,004
	0,20			0,23			
	0,21			0,23			
Флюс Экораф-Ф1	0,22	0,21±0,010	0,162	0,30	0,29±0,007	0,212	+0,05
	0,20			0,29			
	0,21			0,29			
Флюс Ri-Flux	0,23	0,24±0,04	0,173	0,17	0,18±0,008	0,164	-0,009
	0,24			0,18			
	0,24			0,19			
Флюс Биомаг	0,21	0,217±0,04	0,168	0,16	0,17±0,008	0,144	-0,024
	0,22			0,18			
	0,22			0,17			

Максимальное насыщение алюминия водородом происходит при использовании порошковых рафинирующих флюсов и легирующих добавок, содержащих галогениды щелочных и щелочноземельных металлов, некоторые из которых образуют кристаллогидраты. Порошковые флюсы, содержащие гигроскопическую и кристаллизационную влагу, повышают содержание водорода в алюминии на 35-100 %.

3) при несовершенных методах отбора проб из металлотракта, ввода модификаторов в расплав, от контакта с литейным инструментом и оснасткой, когда происходит нарушение целостности наружной оксидной пленки над расплавом.

Исследование влияния содержания и формы водородных включений на структуру и свойства алюминия были проведены с помощью статистической обработки параметров структуры и свойств образцов сплава. Исследование проводили при различной концентрации водорода от 0,08 до 0,22 $\text{см}^3/100\text{ г}$, и различной скорости кристаллизации, т.е. с разной формой растворенного водорода рис. 5.

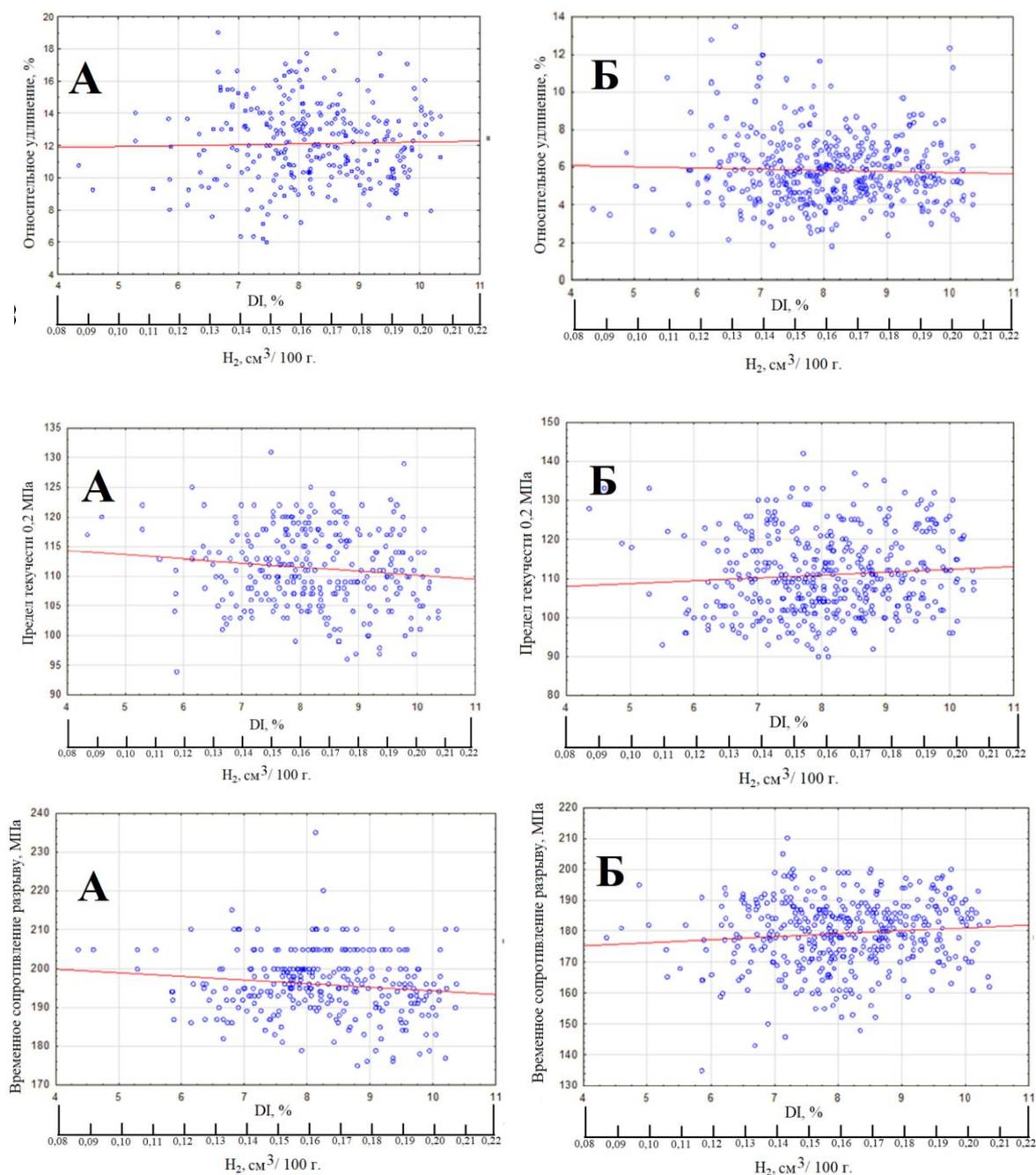


Рисунок 5 – Результаты исследований влияния формы водородсодержащих включений на механические свойства, А – образцы с атомарной формой водородных включений, Б – образцы с молекулярной формой водородных включений.

Полученные результаты показали, что увеличение концентрации водорода с 0,08 до 0,22 $\text{cm}^3/100 \text{ г}$ Al в образцах с атомарной формой водородных включений практически не оказывает влияние на механические свойства алюминия. Присутствие водорода в молекулярной форме в концентрации от 0,08 до 0,22 $\text{cm}^3/100 \text{ г}$ Al резко снижает относительное удлинение с 12 % до 6% и временное сопротивление разрыву с 200 МПа до 175 МПа. Это можно объяснить, что существенное влияние на уровень механических свойств оказывает лишь очень грубая пористость. Неоднозначный характер зависимости удлинения от пористости можно объяснить влиянием на пластичность:

- а) наличием пор, которые сокращают сечение отливки;
- б) ускорение разрушения за счет значительного давления водорода, выделившегося в молекулярной форме в виде пор;
- в) распадом пересыщенного относительно атомарного водорода твердого раствора.

Исследование влияния формы водородных включений на коррозионные свойства выполняли согласно ГОСТ 9.021-74.

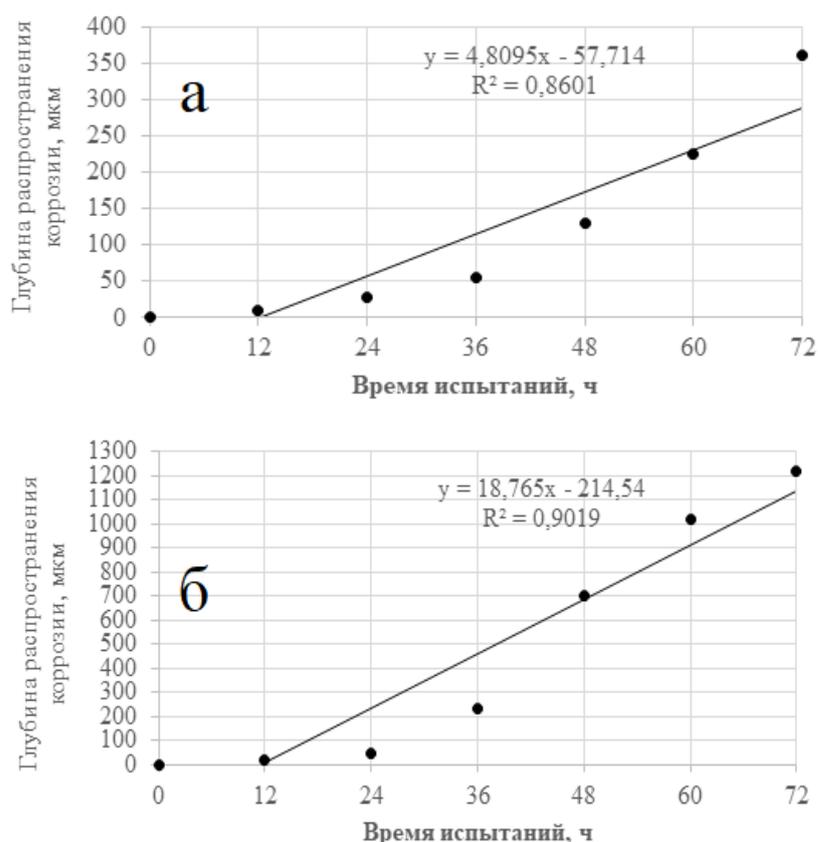


Рисунок 6 – Глубина распространения межкристаллитной коррозии для образцов с атомарной (а) и молекулярной (б) формой водородных включений

Исследования показали, что в процессе эксперимента развитие межкристаллитной коррозии в большей степени проявляется в образцах с молекулярной формой водорода. Средняя глубина распространения межкристаллитной коррозии во время испытаний для образцов с атомарной и молекулярной формой водородных включений показана на рис. 6. Из данного рисунка следует, что водород выделившийся в молекулярной форме увеличивает глубину распространения коррозии на 200%, по сравнению с водородом присутствующем в атомарном состоянии. Это объясняется тем, что в образцах с молекулярной формой водородных включений площадь взаимодействия с раствором больше, за счет имеющейся в структуре водородной пористости.

В качестве технических решений по снижению экспансии водорода в алюминий и рафинированию металла было предложено:

а) использовать закрытые переливы при выливании алюминия-сырца из электролизера ВТК со съёмным сифоном и при заливке расплава из ВТК в миксер. Уменьшение содержания водорода в металле, залитом в миксер, сократит расход флюса на рафинирование расплава и время отстоя металла до разливки. Дополнительный и основной экономический эффект от применения закрытых переливов металла будет получен в результате снижения потерь алюминия за счет окисления. Балансовые обследования выливании алюминия-сырца ВТК с закрытым (сифонным) переливом металла показали снижение потерь металла за счет окисления примерно на 0,9 кг/т алюминия;

б) для дегазации алюминия в ВТК необходимо совместить отстаивание металла с вакуумной обработкой. Во время отстаивания металла в ВТК их накрывают крышкой и создают разрежение над поверхностью металла в ковше. Снижение общего давления над расплавом вызывает рост газовых пузырьков, обогащение их растворенным водородом и всплывание этих пузырьков к открытой поверхности расплава.;

в) с целью исключения применения влажной шихты, лигатуры, модификаторов и флюсов обеспечить их входной контроль, ужесточить правила приема и хранения, при необходимости проводить их сушку, для их навески использовать герметичную упаковку;

г) необходимо изменить методику отбора пробы: исключить, перелив металла из пробоотборной ложки в изложницу и использовать изложницу непосредственно в качестве пробоотборника.

В четвертой главе представлены новые технические и технологические решения в области производства слитков из алюминиевых сплавов с пониженным содержанием водорода.

Для понижения содержания водорода в расплаве алюминия и его сплавах на металлургических предприятиях ОК РУСАЛ наиболее целесообразным является использование закрытых переливов при выливании алюминия-сырца из электролизера в вакуум-транспортный ковш со съёмным сифоном и при заливке расплава из данного ковша в миксер. На рис. 7 показана принципиальная конструкция ВТК со съёмным сифоном.

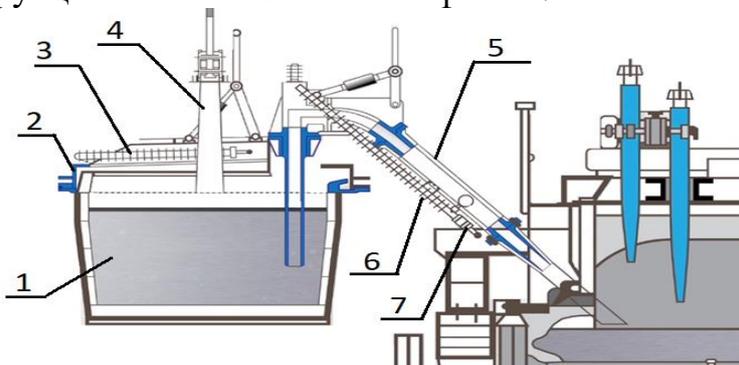


Рисунок 7 – Вакуум-транспортный ковш со съёмным сифоном. 1 – Стальной корпус; 2 – футерованная огнеупорным кирпичом крышка с жаровой трубой; 3 – грузоподъемная траверса. 4 – съёмный сифон; 5 сливная труба; 6 вторая жаровая труба, 7 – с запирающее устройство.

Оригинальность данного устройства подтверждается полученным на нее патентом РФ № 2659556, в котором защищен ряд оригинальных технических решений по совершенствованию конструкции ВТК с сифоном для выливки алюминия из электролизеров. При выливки алюминия из электролизера по традиционной технологии содержание водорода в нем увеличивается с $0,127 \pm 0,010$ до $0,176 \pm 0,017$ $\text{см}^3/100$ г, в среднем на $0,049$ $\text{см}^3/100$ г. Выливка алюминия опытным ковшом с сифоном увеличивает концентрацию водорода в металле с $0,136 \pm 0,006$ до $0,165 \pm 0,022$ $\text{см}^3/100$ г. в среднем на $0,029$ $\text{см}^3/100$ г. (рис. 8)

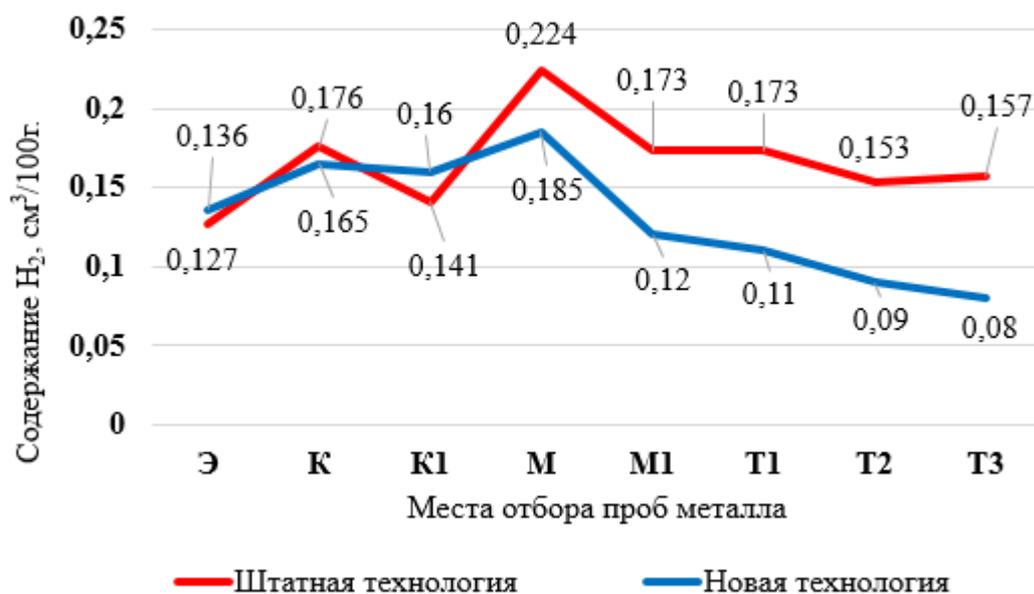


Рисунок 8 - Изменение концентрации водорода в жидком металле на основных этапах литейного передела производства мелкой чушки из алюминиевых сплавов с использованием штатной и новой технологии. Э – электролизеры; К – ковши до отстоя металла; К1 – ковши после отстоя металла; М – миксеры после заливки металла; М1 – миксеры перед разливкой металла; Т1 – Т3 – точки отбора проб из литейных металлотрактвов

В рамках совершенствования существующей АТС предложено техническое решение, направленное на снижение концентрации водорода в алюминии при его отстаивании. Для интенсификации дегазации алюминия при отстаивании предложено проводить вакуумную обработку металла в ВТК. По результатам экспертизы заявленного технического решения получен патент на изобретение № 2668640 «Способ вакуумной обработки алюминия и алюминиевых сплавов». Технический результат достигается тем, что в способе вакуумной обработки алюминия и алюминиевых сплавов, включающем выдержку жидкого металла в вакууме при контролируемой температуре, обработку алюминия и его сплавов проводят в вакуум-ВТК с крышкой во время технологического отстоя металла перед заливкой в миксер, при этом отношение площади поверхности расплава в ковше (м^2) к объему металла в ВТК (м^3) поддерживают не менее 1,10, а вакуумную обработку проводят до тех пор, пока температура металла в ВТК не снизится до $780 \pm 10^\circ\text{C}$.

Следующий участок аппаратурно-технологической схемы транспортировки, подготовки и разлива металла, на котором расплав алюминия насыщается водородом - это перелив алюминия из вакуум-транспортного ковша в миксер. По действующей технологии перелив алюминия производят открытой струей через лоток в результате наклона ковша. При этом струя расплава падает в заливочный карман миксера с высоты 1,5÷2,0 м. При падении струи расплава алюминия происходит эжекция пузырьков воздуха в объем металла, находящегося в миксере. Следствием этих процессов является насыщение расплава в миксере водородом и оксидными включениями. При выливке алюминия из ковша в миксер по традиционной технологии содержание водорода в нем увеличивается с 0,141 до 0,224 см³/100 г, в среднем на 0,083 см³/100 г. Выливка алюминия опытным ковшом с сифоном увеличивает концентрацию водорода в металле с 0,160 до 0,185 см³/100 г. в среднем на 0,025 см³/100 г. Таким образом, использование «закрытого» перелива металла при выливке из ковша в миксер снижает насыщение алюминия водородом на 70% (с 0,083 до 0,025 см³/100 г Al).

К положительным моментам сифонного перелива расплава алюминия относится отсутствие шлака на поверхности перелитого в миксер металла. Расплав через сифон сливается в миксер ламинарным потоком. Удельное шлакообразование по «штатной» технологии составило 1,962 кг/т Al, а при использовании опытного ВТК с сифоном удельный съём шлака составил 1,204 кг/т Al, т.е. снизился на 0,758 кг/т Al или на 39 %.

В процессе проведения исследований удалось установить, что при охлаждении расплавленного алюминия менее 800 °С, концентрация растворенного в расплаве водорода снижается в среднем до 0,13÷0,15 см³/100 г Al, дополнительно следует отметить, что время за которое происходит снижение температуры до данных значений варьируется от 60-70 мин.

На основании изменений в аппаратурно-технологической схеме и полученных результатов по снижению содержания водорода при охлаждении металла, внесены изменения в технологию производства литейных сплавов, которые предписывают:

- обрабатывать жидкий алюминий в вакуум-транспортных ковшах экспериментальной машиной «ТАС».

- охлаждать металл до температуры не более 800°С за счет увеличения продолжительности отстаивания ковшей;

- поднять температуру кремния на подине миксера перед заливкой алюминия за счет увеличения времени прогрева кремния минимум до 30 мин;

- повысить подачу аргона до 6,0 м³/ч (на два ротора) и увеличить скорость вращения роторов до 600 об/мин.

С учетом принятых технологических изменений отлили семь опытных партий литейных алюминиево-кремниевых сплавов.

Полученные результаты по опытным плавкам, усредненные по двум параллельным пробам, представлены в таблице 3.

Таблица 3 Содержание водорода в готовом литейном сплаве.

Номер плавки	Среднее содержание водорода по замерам с использованием анализатора «AlScan», см ³ /100 г Al
02-0787	0,098±0,002
17-1348	0,097±0,003
02-0788	0,086±0,003
17-1349	0,090±0,004
02-0790	0,088±0,002
17-1351	0,090±0,004
02-0791	0,083±0,002

Полученные результаты подтверждают факт достижения заявленной в работе остаточной концентрации водорода в литейных сплавах, произведенных на линии «Brochot» (менее 0,10 см³/100 г Al).

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате проведенных диссертационных исследований в настоящей работе решена актуальная научно-техническая проблема, направленная на повышения качества заготовительного литья алюминия и его сплавов за счет снижения содержания водорода менее чем 0,10 см³/100 г Al, при этом получены следующие основные результаты:

1. На основе обобщения проведенного анализа научно-технической литературы и экспериментального материала, полученного непосредственно в промышленных условиях, установлено, что основными факторами, влияющими на интенсивность процесса насыщения алюминиевого расплава водородом, являются технологические условия литья, химический состав расплава, влажность шихты и окружающей среды.

2. Установлены закономерности влияния размера дендритной ячейки на изменение концентрации различных видов водородных включений в объеме слитков из алюминиевых сплавов. Так при среднем размере дендритной ячейки более 45 мкм водород выделяется в молекулярном состоянии, а при среднем размере дендритной ячейки менее 30 мкм водород выделяется в атомарном состоянии.

3. Создана методика отбора проб на содержание водорода с использованием изложницы-пробоотборника, которая исключает субъективные факторы, влияющие на пробоотбор, существенно сокращает время пробоотбора и позволяет отбирать пробы металла из металлургических емкостей с различной глубины и на расстоянии до точки отбора пробы в несколько метров. На данную методику получен Патент РФ 2651031 «Способ отбора пробы жидкого металла».

4. Разработано технологическое решение для «закрытого» перелива расплава из электролизера в ВТК с использованием сифона, снижающее насыщение алюминия водородом на 40% (с 0,049 до 0,029 см³/100 г Al), оригинальность оборудования для реализации данной технологии подтверждается полученным патентом РФ № 2659556, в котором защищен ряд оригинальных технических решений по совершенствованию конструкции ВТК с сифоном;

5. Предложено технологическое решение для рафинирования алюминия в ВТК перед заливкой в миксер, на что получен патент РФ на изобретение № 2668640 «Способ вакуумной обработки алюминия и алюминиевых сплавов»;

6. Разработано технологическое решение для «закрытого» перелива расплава из ВТК в миксер с использованием сифона, снижающее насыщение алюминия водородом на 70% (с 0,083 до 0,025 см³/100 г Al).

7. Разработан новый технологический регламент для производства литейных сплавов в виде малогабаритной чушки на линии «Brochot» обеспечивающие концентрацию водорода менее 0,1 см³/100 г Al, что подтверждается соответствующим актом опытно-промышленных испытаний и отражено в разработанном регламенте (2ТР 501.2.01.2 (Ред.1) Технология производства МЧ из литейного сплава на линии «Brochot» в ЛО-1 с содержанием H₂ до 0,1 см³/100 г Al)

8. Разработано устройство для отбора пробы жидкого металла, патент РФ на полезную модель 174042.

9. Разработано устройство для отбора пробы жидкого металла из металлотракта, патент РФ на полезную модель 175093.

10. Экспериментальным методом установлено влияние легирующих добавок и флюсов на насыщение алюминиевых расплавов водородом, заключающееся в увеличении концентрации водорода в расплаве алюминия при вводе Si в количестве 7% на 0,072 см³/100 г Al, при вводе лигатуры Al-Ti в количестве 0,1% на 0,038 см³/100 г Al, при вводе лигатуры Mn-Flux в количестве 0,03% на 0,072 см³/100 г Al, при вводе лигатуры Fe-Flux в количестве 0,1% на 0,04 см³/100 г Al, при вводе Mg в количестве 0,3% на 0,146 см³/100 г Al, при вводе лигатуры Al-Sr в количестве 0,02% на 0,018 см³/100 г Al, при вводе лигатуры Al-5Ti-1B в количестве 1,5 кг/т на 0,075 см³/100 г Al, при вводе Cu в количестве 1% на 0,008 см³/100 г Al.

11. Исследована закономерность влияния различных видов водородных включений на коррозионные в алюминии и его сплава, заключающиеся в том, что водород выделившийся в молекулярной форме увеличивает глубину распространения коррозии на 200%, по сравнению с водородом присутствующем в атомарном состоянии.

12. Проведены сравнительные исследования концентрации и различных видов водородных включений на механические свойства алюминия и его сплавов. Увеличение концентрации водорода с 0,08 до 0,22 см³ /100 г Al в

образцах с атомарной формой водородных включений практически не оказывает влияние на механические свойства алюминия. Присутствие водорода в молекулярной форме в концентрации от 0,08 до 0,22 см³/100 г Al резко снижает относительное удлинение с 12 % до 6% и временное сопротивление разрыву с 200 МПа до 175 МПа отливок из алюминиевых сплавов.

13. Результаты исследований внедрены в учебный процесс и используются при обучении магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и магистерской программе 22.04.02.07 «Теория и технология литейного производства цветных металлов и сплавов» и аспирантов по специальности 05.16.04 «Литейное производство».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Куликов Б.П. Совершенствование методики отбора пробы жидкого металла для анализа на содержание водорода. Куликов Б.П., Баранов В.Н., **Партыко Е.Г.**, Юрьев П.О., Янов В.В. Совершенствование методики отбора пробы жидкого металла для анализа на содержание водорода // *Металлург*. 2020. № 12. С. 56-59 (**рекомендуемое из перечня ВАК**).
2. Kulikov B.P. Improved molten metal sampling method for hydrogen content analysis. Kulikov B.P., Baranov V.N., **Partyko E.G.**, Yur'ev P.O., Yanov V.V. // *Metallurgist*. 2021. № 11-12. С. 1295-1299 (**рекомендуемое из перечня ВАК**).
3. Баранов В. Н. Влияние легирующих, модифицирующих и флюсовых добавок на насыщение алюминия водородом/ В. Н. Баранов, Б. П. Куликов, **Е.Г. Партыко**, А.А. Косович // *Цветные металлы*. – 2021. — №7. - С. 45-51. (**рекомендуемое из перечня ВАК**).
4. Баранов В. Н. Технология и оборудование для закрытого перелива расплава из вакуум-транспортного ковша с использованием сифона/ В. Н. Баранов, Б. П. Куликов, **Е.Г. Партыко**, П.О. Юрьев // *Цветные металлы*. – 2021. — №6. - С. 39-43. (**рекомендуемое из перечня ВАК**).
5. Baranov V.N. Influence of atomic and molecular hydrogen in silumins melts on their mechanical properties. Baranov V.N., **Partyko E.G.**, Belyaev S.V., Yur'ev P.O., Deev V.B., Prusov E.S. // *Metallurgist* 2019. Vol. 63, № 5-6 P. 521-528. (**рекомендуемое из перечня ВАК**).
6. **Partyko E.G.** Influence of the shape of hydrogen-containing inclusions on the intergranular corrosion process of the Al. - Si alloy system **Partyko E.G.**, Gubanova M.I., Tolkachyova D.V., Deev V.B. // *NON-FERROUS METALS* 2018. Vol. 45, № 2 P. 16-21(**рекомендуемое из перечня ВАК**).
7. Куликов Б. П. Исследование поведения водорода в алюминиевом сплаве при производстве мелкой чушки на алюминиевом заводе ОК Русал/ Куликов Б.П., Беляев С.В., Фролов В.Ф., Губанов И.Ю., Лесив Е.М., Юрьев П.О., **Партыко Е.Г.** // *Журнал сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии*. – 2019. — №4. - С. 398-408. (**рекомендуемое из перечня ВАК**).

8. Баранов В.Н. Влияние атомарного и молекулярного водорода в расплаве силуминов на их механические свойства. Баранов В.Н., Деев В.Б., **Партыко Е.Г.**, Беляев С.В., Юрьев П.О., Прусов Е.С. // *Металлург*. 2019. № 5. С. 81-86. **(рекомендуемое из перечня ВАК)**
9. Баранов, В.Н. Модернизация аппаратурно-технологической схемы для снижения содержание водорода на основных этапах литейного передела производства плоских слитков из алюминиевых сплавов / Баранов В.Н., Беляев С.В., Фролов В.Ф., Куликов Б.П., Губанов И.Ю., **Партыко Е.Г.** // *Литейщик России*. – 2018. – № 12. – С. 22–27. **(рекомендуемое из перечня ВАК)**
10. Баранов В.Н. Оборудование для закрытого перелива Al-расплава из вакуум-транспортного ковша в миксер. Баранов В.Н., Куликов Б.П., Беляев С.В., Деев В.Б., **Партыко Е.Г.**, Юрьев П.О., // *Металлургия машиностроения*. 2020. № 2. С. 5-6. **(рекомендуемое из перечня ВАК)**
11. Патент № 2668640 С1 Российская Федерация, МПК С22В 21/06, С22В 9/04- № 2017138042, Способ вакуумной обработки алюминия и алюминиевых сплавов / Куликов Б.П., Баранов В.Н., Фролов В.Ф., Беляев С.В., Омеляненко М.В., **Партыко Е.Г.**, Зайцев А.С. [и др.]; заявл. 31.10.2017; опубл.: 02.10.2018 Бюл. № 28.
12. Патент № 2659556 С1 Российская Федерация, МПК В22D 41/00 - № 2017120236, Вакуумный ковш для забора жидкого металла / Куликов Б.П., Баранов В.Н., Фролов В.Ф., Беляев С.В., Омеляненко М.В., **Партыко Е.Г.** заявл. 08.06.2017; опубл.: 02.07.2018 Бюл. № 19.
13. Патент № 2651031 С1 Российская Федерация, МПК G01N 1/12- № 2017120237, Способ отбора пробы жидкого металла/ Куликов Б.П., Фролов В.Ф., Беляев С.В., Омеляненко М.В., **Партыко Е.Г.**; заявл. 08.06.2017; опубл.: 18.04.2018 Бюл. № 11.