Вредные примеси в алюминиевых сплавах и способы очистки

Салдаев Сергей Александрович
Студент СФУ, Россия, г.Красноярск
Начальник Службы качества АО «РУСАЛ Кандалакша»
E-mail: sals75@mail.ru

Кудринский Евгений Алексеевич
Мастер-технолог литейного отделения АО «РУСАЛ Кандалакша»

Научный руководитель: **Безруких Александр Иннокентьевич,**
Кандидат технических наук.
Кафедра литейного производства,
СФУ. Россия, г.Красноярск

Вследствие высокой химической активности алюминия и ряда легирующих элементов промышленная технология плавки и литья алюминиевых сплавов не обеспечивает получения чистых по примесям отливок. Степень загрязнения алюминиевых расплавов определяется чистотой и компактностью исходных шихтовых материалов, а также совершенством технологического процесса и культурой производства.

Примеси снижают общий уровень качества готового продукта, становятся причиной различных видов брака, снижения выхода годного и ухудшения экономических показателей производства. Поэтому уровень содержания примесей является одним из основных факторов получения годного изделия.

Установлено, что и для литейных, и для деформируемых сплавов к наиболее вредным примесям относятся: водород и включения оксида алюминия.

Повышение содержания водорода в металле ведет к образованию в заготовке таких дефектов как газовая и газоусадочная пористость, которые отрицательно воздействуют на технологичность заготовки, что может привести к повышенной обрывности проводов тонкого и сверхтонкого сечения, получаемых из исходной катанки при ее последующем волочении.

Исследователи [1] считают, что причины попадания водорода в алюминий и его сплавы связаны со следующими факторами: во-первых, с электролитическим способом получения алюминия, при котором имеет место электролиз воды, адсорбированной электролитом, во-вторых, с взаимодействием расплава с водяным паром, содержащимся в атмосфере миксера [45]. Дополнительное насыщение расплава водородом может происходить также за счет наличия влаги, содержащейся в легирующих компонентах.

Наряду с водородом в металле в том или ином количестве всегда присутствуют твердые неметаллические включения (оксиды, карбиды, нитриды, сульфиды, шлаковые и флюсовые включения, кусочки футеровки и т.п.). Наиболее вредной твердой неметаллической примесью принято считать оксид алюминия, который неизбежно присутствует в расплаве, независимо от состава шихты и выбранной технологии.

Оксид алюминия может присутствовать в расплаве в двух модификациях: в виде обрывков поверхностной оксидной пленки α-Al_2O_3 (ρ=3900 — 4020 кг/м^3), которая пассивна к водороду, и дисперсной γ-Al_2O_3 (ρ=3220 — 3700 кг/м^3), образующей с водородом комплексное соединение γ-Al_2O_3 * xH [1].

Обычно при прочих равных условиях [1,5] увеличение содержания оксида алюминия повышает вязкость расплава и снижает его жидкотекучесть. Установлено [6], что величина линейной усадки зависит от газосодержания расплава, причем газовыделение в процессе кристаллизации сплава сильно сказывается на той части линейной усадки, которая развивается в эффективном интервале кристаллизации. Показано также, что из всех групп промышленных сплавов наиболее чувствительными к появлению газовой пористости являются алюминиевые сплавы. Главной причиной здесь является особенность поведения водорода, обусловленная тем, что он находится в пересыщенном твердом растворе. Кроме того, на величину газовой пористости оказывает влияние оксид алюминия, поскольку с увеличением его содержания возрастает газосодержание расплава.

В работах [1, 4-7] установлено, что между содержанием водорода и пористостью отливок из алюминиевых сплавов существует прямолинейная зависимость. Авторами работ [4, 5, 7] рекомендуются следующие предельно допустимые содержания водорода в литейных сплавах на основе первичного алюминия — 0,15-0,20 $см^3$/100 г Ме.

Исследованиями Б.Б. Гуляева [8, 9] установлено, что механические свойства литого материала определяются его структурой и развитием пористости.

Установлено отрицательное влияние как крупных оксидных включений и плен, так и тонкодисперсных оксидных включений на прочностные свойства, возникновение трещин, появление очагов усиленной коррозии, развитие макропористости и усадочной рыхлоты, повышение вязкости расплавов и т.д.

Одним из наиболее эффективных путей решения проблемы получения требуемого конечного содержания примесей в отливках является рафинирование сплавов.

Все способы рафинирования можно разделить на способы, направленные на удаление одной — двух примесей, и способы, позволяющие эффективно удалять целую гамму примесей. К последним относятся способы комбинированной обработки расплава, в том числе в потоке на стадии разливки. Их использование обеспечивает достаточно высокую производительность, автоматизацию процесса, экономию рабочей силы и улучшение условий труда. Учитывая это, они представляются наиболее эффективными и перспективными.

Рафинирование может осуществляться газовыми, жидкими и твердыми средами. Известны также способы, в основе которых лежит обработка расплавов воздействием полей (гравитационного, электрического, магнитного и кавитационного). Установлено, что при воздействии этих полей на расплав с целью удаления примесей достигаются приемлемые результаты, однако сложная и малонадежная техника, применяемая для реализации этих методов, делают эти способы малодоступными.

Вакуумная обработка расплавов алюминиевых сплавов, позволяет достаточно успешно удалять водород, а также, в некоторой степени, понижать содержание взвешенных в расплаве оксидных включений. Однако из-за высокой стоимости и сложности оборудования вакуумная обработка широко не практикуется на производстве.

Обработка расплава рафинирующими газами с целью удаления водорода является наиболее распространенным способом, применяемым в цехах литья алюминия и сплавов на его основе.

Рафинирующие газы делятся на две группы: нейтральные и активные. Нейтральные не вступают во взаимодействие с алюминиевым расплавом, активные же образуют с алюминием или входящими в состав сплава компонентами химические соединения.

К нейтральным следует, в первую очередь отнести инертные газы: He, Ne, Ar, Kr, Xe. Из них в металлургии наиболее широкое применение получил Ar. Аргон сравнительно дешев, недефицитен

и может быть получен в больших количествах. Для рафинирования применяют аргон высшего и первого сортов (ГОСТ 10157-79). Применение остальных газов этой группы является экономически нецелесообразным.

Азот до некоторой степени можно отнести к группе нейтральных газов, и поэтому он часто используется для обработки алюминиевых расплавов. Однако следует отметить, что реакция его взаимодействия с жидким алюминием ($2A1+N_2=2A1N$) термодинамически возможна, но она получает заметное развитие только при температуре выше 1000 К [10]. Наличие Mg в сплаве заметно усиливает взаимодействие азота с расплавом с образованием нитридных фаз уже при 730°С. Это отрицательно сказывается на пластических характеристиках литого металла. На практике продувку алюминиевых расплавов азотом проводят, как правило, в тех случаях, когда содержание магния в них не превышает 2% [7].

В системе расплавленный металл — рафинирующий газ при избытке растворенного водорода в расплаве по отношению к его содержанию в газовой фазе должно иметь место перераспределение водорода. Этот процесс перехода водорода в рафинирующий газ будет протекать до установления равновесия между расплавом и газовой фазой.

Возможны два процесса: выстаивание расплава в среде нейтрального газа или продувка (барботаж) его нейтральным газом. Барботаж является более выгодным процессом по сравнению с выстаиванием: при одном и том же удельном расходе газа он обеспечивает более высокую степень удаления водорода либо при равной степени удаления — экономию рафинирующего газа [11].

Обычно продувку производят через графитовые трубки, снабженные насадками с диаметром отверстий 1-2 мм. Газ подается при избыточном давлении 0,007-0,15 атм. Расход газа 0,1-1,0 % от объема обрабатываемого металла [11]. Максимальный эффект при обработке нейтральными газами дает использование пористых насадок, которые изготавливают из различных огнеупоров (корунд, графит и т.д.). Эффект рафинирования в данном случае возрастает из-за измельчения пузырьков газа, которое обеспечивает увеличение поверхности контакта, рафинирующий газ — расплав.

Среди активных газов наиболее часто применяется хлор. При введении в алюминиевый расплав он образует летучий хлористый алюминий, а со сплавами, содержащими магний — хлористый магний; при наличии в составе сплава натрия образуется хлористый натрий. Диффундирующий в пузырь водород, связывается хлором в устойчивое при температуре рафинирования химическое соединение НС1, разложению которого алюминием препятствует образовавшаяся на пузырьке солевая пленка, парциальное давление водорода в пузырьке не увеличивается по мере его всплывания в расплаве, что благоприятствует дегазации. Следовательно, хлор вступает как в химическое, так и в физическое взаимодействие с алюминиевым расплавом [7].

Но хлор является высокотоксичным элементом и, кроме того, способствует интенсивной коррозии оборудования. Летучие продукты взаимодействия хлора с алюминиевым расплавом тоже токсичны. Эти факторы обусловили постепенный отказ от применения обработки алюминиевых расплавов хлором. В настоящее время хлор используют только в качестве активной добавки к нейтральным газам.

Наиболее широкое применение в производстве нашли смеси нейтральных газов с хлором. Смесь 80% хлора и 20% азота практически не отличалась по эффективности от хлора, а смеси с 50, 20 и 10 % хлора занимали промежуточное положение между чистым хлором и азотом [12].

Обработка алюминиевых расплавов газами и смесями газов может осуществляться в печах,

миксерах, ковшах и специальных камерах рафинирования. Место обработки определяется спецификой производства, наличием специального оборудования, а также типом обрабатываемого сплава. Литейные сплавы, в силу технологических особенностей чаще обрабатываются в печах и ковшах, причем предпочтительнее — в ковшах перед разливкой, так как в этом случае максимально снижается вероятность дополнительного загрязнения металла. В случае деформируемых сплавов наиболее эффективной представляется порционная обработка расплава в процессе разливки, что также снижает возможность дополнительного загрязнения расплава, а главное, обеспечивает равномерную и более полную обработку жидкого металла, чего сложно добиться при обработке всего объема металла в печи.

Необходимо отметить, что при обработке расплавов газами и газовыми смесями, с целью удаления водорода, происходит частичное удаление взвешенных оксидных включений. Процесс удаления взвешенных включений из расплава в процессе его продувки рафинирующим газом объясняется флотацией включений пузырьками газовой фазы к поверхности расплава, где эти включения переходят в шлаковую фазу.

Эффективным методом рафинирования алюминия и его сплавов от взвешенных в расплаве неметаллических включений является фильтрование. Сущность фильтрования состоит в пропускании расплавленного металла через фильтры, изготовленные из нейтральных или активных по отношению к нему материалов [4].

Удаление взвешенных включений, в ходе фильтрования, может осуществляться по трем механизмам [13] (рисунок 9).

Фильтрование тем эффективнее, чем в большей степени реализуются в его ходе все три представленные механизма.

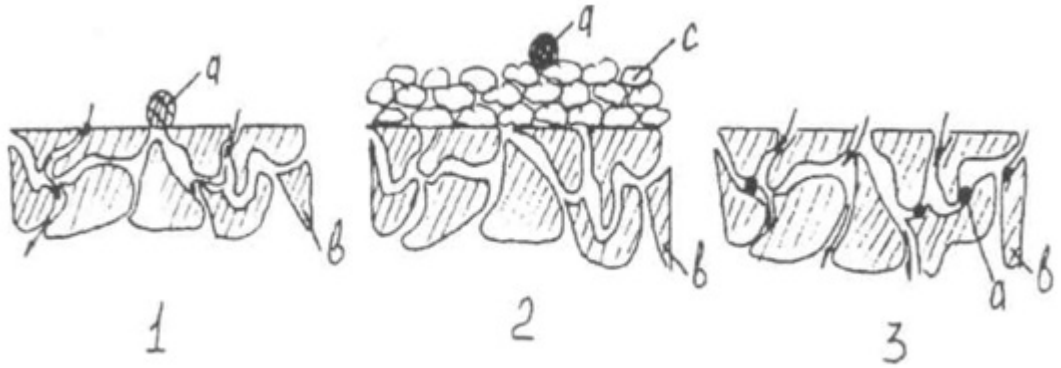

Рисунок 9 — Основные механизмы фильтрования

(*а* — включения, *в* — фильтр, *с* — осадок (кековый слой));

1. Механическое задерживание включений, размеры которых больше, чем диаметр отверстий фильтра;

2. Задержание включений осадком, который образуется на поверхности фильтра (кековое фильтрование);

3. Глубинное фильтрование, с задержанием включений в толще фильтра.

Существует несколько направлений реализации фильтрования. Первое из них — фильтрование расплава через сетчатые материалы (стеклоткань, металлическая сетка, например, из титана и др.). Этот вид очистки используется как при получении изделий из литейных сплавов, так и при литье слитков из деформируемых сплавов: в первом случае фильтр устанавливается в литниковую систему формы, а во втором — на пути металла от летки раздаточного миксера до кристаллизатора.

При фильтровании через сетчатые материалы происходит механическое отделение включений на сетчатом фильтре и частично в кековом слое.

Преимущества сетчатых фильтров — простота конструкции, возможность установки на любых участках перелива металла при литье слитков и небольшие затраты, связанные с их изготовлением и использованием.

Однако данные фильтры обладают недостатком, который ограничивает их рафинирующую способность. Эти фильтры задерживают только крупные включения. Также необходимо отметить, что процент включений, отделяемых кековым фильтрованием чрезвычайно невелик из-за сложности формирования и нестабильности кекового слоя. К тому же вероятность кекового фильтрования снижается с ростом размера ячеек.

Из-за отсутствия глубинного фильтрования тонкодисперсные включения не задерживаются вообще. Поэтому эти фильтры можно использовать только для грубой очистки.

Второе направление — фильтрование через твердые кусковые материалы (зернистые фильтры). Этому направлению исследователями уделяется много внимания [2].

Интерес к этому способу можно объяснить большей эффективностью зернистых фильтров по сравнению с сетчатыми. Наряду с более тонкой очисткой по взвешенным неметаллическим включениям, на 30-40 % снижается газосодержание расплавов и укрупняется макрозерно слитка, что можно объяснить улавливанием тонкодисперсной модификации γ-Al_2O_3, которая является возможным центром кристаллизации, снижение ее содержания в расплаве ведет к укрупнению макроструктуры. Как уже было отмечено, γ-Al_2O_3 образует с водородом комплексы γ-Al_2O_3*xH, поэтому при фильтровании через зернистые фильтры возможно снижение уровня газосодержания расплава.

Простейший зернистый фильтр — это слой однородных кусочков фильтрующего материала определенной толщины. Однако трудоемкость изготовления его обуславливает тенденцию по использованию фильтров, состоящих из кусочков разного размера; иногда же используют многослойные фильтры. Эти фильтры обладают большой поверхностью контакта между металлом и материалом фильтра и длинными тонкими каналами переменного сечения.

Скорость перемещения металла в таких фильтрах переменная и в местах перехода из одного сечения канала в другое образуются завихрении с зонами пониженного давления. Эти гидродинамические явления повышают эффективность работы зернистых фильтров.

Ощутимую роль в более тонкой очистке играют адсорбционные силы, проявляющиеся в смачивании металлом материала фильтра. Фильтры из смачивающихся материалов в 2-3 раза эффективнее, чем из не смачивающихся [4].

При прохождении металлом узких каналов фильтра возникают благоприятные условия для контакта включений с поверхностью фильтра, налипания их и возможного физико-химического взаимодействия между ними.

В качестве материалов фильтра используют шамот, магнезит, алунд, кремнезем и др. Рекомендуется применять комбинированные фильтры из крошки магнезита, пропитанной различными солями. Чаще всего используют магнезит и сплав фторидов магния и кальция в соотношении 1:1. Фильтрование через фториды эффективнее, чем через магнезит, так как последний не смачивается алюминиевым расплавом.

Однако, несмотря на преимущества использования активных фильтров (очистка от водорода и оксидных включений), они не нашли пока широкого применения, прежде всего из-за быстрого разрыхления.

К недостаткам зернистых фильтров можно отнести их разрыхляемость и забиваемость каналов.

В настоящее время все большее признание приобретают жесткие фильтры из пенокерамики. Отмечается [14], что наилучшие результаты по очистке расплавов алюминиевых сплавов от дисперсных включений размером 5-10 мкм достигаются при использовании пенокерамических фильтров с фиксированным числом пор (до 20 шт./см^2), которые обеспечивают оптимальное сочетание высокой пропускной способности, малого перепада давлений, прочности, ресурса работы и рафинирующей способности.

Пенокерамические фильтры обладают рядом важных преимуществ. Во-первых, при фильтровании через них, реализуются все три механизма улавливания: механическое, кековое и глубинное. В связи с этим при фильтровании задерживаются взвешенные неметаллические включения всех размеров (грубо- и тонкодисперсные). Во-вторых, эти фильтры удобны и просты в эксплуатации. В-третьих, появляется возможность их использования в фасонном литье. Благодаря высокой рафинирующей способности, их применение предпочтительнее, чем сетчатых как в фасонном, так и в заготовительном литье. По этой же причине, а также из-за простоты и надежности в эксплуатации их применение целесообразнее, чем зернистых фильтров.

При применении пенокерамических фильтров очистка от крупных включений осуществляется за счет механического задержания на поверхности фильтра и кекового фильтрования, тонкодисперсные же включения, в основном, задерживаются за счет адсорбции на стенках каналов фильтра.

Удаление водорода при фильтровании через нейтральные пенокерамические фильтры происходит за счет диффузии его из расплава, разбитого на струю диаметром менее 5 мм, не имеющие на своей поверхности оксидной пленки. Процесс удаления водорода облегчается зарождением его пузырьков на острых гранях фильтра. Однако степень дегазациии за счет диффузии невелика. Дополнительное понижение уровня газосодержания достигается из-за улавливания комплексов γ-Al_2O_3*xH.

Одной из наиболее практикующихся в цехах приготовления сплавов на основе алюминия операций рафинирования является рафинирование флюсами, заключающееся в обработке расплава жидким флюсом или флюсом, плавящимся при внесении его на поверхность или вглубь расплава.

В качестве флюсов применяются, преимущественно, смеси хлористых и фтористых солей щелочных и щелочноземельных металлов, а также криолит и фтористый алюминий [4]. Такие смеси удобны в употреблении, так как на их основе можно получать комбинации флюсов с меньшей плотностью и более низкой температурой плавления, чем у алюминиевых сплавов.

Чаще всего для рафинирования большинства сплавов на основе алюминия используют флюсы с криолитом, причем содержание его изменяется в широких пределах от 5 до 25% [15]. Замена натриевого криолита на калиевый дает хорошие результаты при обработке деформируемых сплавов [4].

Флюсы на основе хлоридов магния и калия используют, преимущественно, при плавке A1-Mg сплавов, хотя не исключено их применение при обработке других деформируемых сплавов [4].

Для обработки алюминиевых сплавов также применяются универсальные флюсы, оказывающие рафинирующе-модифицирующее воздействие, то есть наряду с очисткой расплавов от вредных примесей они модифицируют расплав через перевод в него таких элементов как Na, Sr, Ti, B. В качестве примера универсальных флюсов, можно привести флюсы следующих составов

(% масс): 42%NaC1+42%KC1+6%NaF+6%K_2TiF_6+4%KBF_4, 50%NaC1+10%KC1+10%Na_3A1F_6+30%NaF [4].

Механизм очистки алюминиевых расплавов от взвешенных неметаллических включений при флюсовой обработке базируется на удалении их из расплава за счет адсорбции, растворения или химического взаимодействия с расплавленными солями.

Основой большинства флюсов, используемых в алюминиевой промышленности, являются хлориды натрия и калия. Смеси этих солей обладают сравнительно низкой температурой плавления и малым краевым углом смачивания [16]. Для обеспечения хорошего отделения флюса, включающего соли с малым краевым углом смачивания и плохо отделяющиеся от расплава, и во избежание попадания флюса в отливку, добавляют некоторое количество какой-либо фтористой соли, повышающей поверхностное натяжение на границе с расплавом и способствующей отделению флюса вместе с неметаллическими примесями.

Обработка флюсами сопровождается дегазацией расплава [17]. Дегазация, при флюсовой обработке, проявляется в двух направлениях. Во-первых, часть поглощенного водорода удаляется вместе с адсорбированными включениями. Во-вторых, растворенный водород удаляется из расплава в результате продувки парами субхлоридов (субфторидов) и фтористого алюминия, образующихся в результате диссоциации составляющих флюса и протекания обменных реакций в металле.

Но дегазирующее воздействие флюса малоэффективно — в условиях производства оно позволяет снизить газосодержание только до 0,2-0,25 $см^3$/100г Ме [5].

Широкое признание получила рафинирующая обработка расплавов гексахлорэтаном (C_2C1_6), который в отличие от неорганических хлоридов ($ZnCl_2$, $MgCl_2$, $MnCl_2$), рафинирующее воздействие которых аналогично хлору, негигроскопичен, не требует специальных условий для хранения и не загрязняет алюминий металлом.

Несмотря на высокую рафинирующую способность, использование гексахлорэтана затруднено, так как газообразные продукты, выделяющиеся при обработке токсичны. Поэтому гексахлорэтан должен применяться не в чистом виде, а как добавка в флюсовые и газофлюсовые смеси.

Увеличение рафинирующей способности флюсового рафинирования достигается за счет использования следующих способов:

• заливка расплава в раздаточный ковш, на дно которого, перед заливкой помещают порцию флюса — при наполнении ковша происходит интенсивное перемешивание металла с флюсом, приводящее к образованию большой поверхности контакта между ними;

• обработка расплава в индукционной печи жидким флюсом — интенсивная промывка поверхностных слоев металла и замешивание флюса в расплав осуществляется за счет электромагнитного перемешивания;

• рафинирование в магнитодинамических установках — металл активно контактирует с флюсом посредством многократной непрерывной подачи расплава под действием электромагнитных сил к границе раздела флюс-металл;

• механическое диспергирование флюса в металле с помощью импеллера;

• электрофлюсовое рафинирование — позволяет осуществлять непрерывное рафинирование струи металла путем пропускания ее через слой флюса и наложения электрического поля на границе металл-флюс, что улучшает физико-химические условия рафинирования.

Рассматривая способы интенсификации флюсового рафинирования необходимо отметить недостатки присущие некоторым из них. Так, рафинирование в магнитодинамических установках и электрофлюсовое рафинирование требует использования сложного дорогостоящего оборудования.

Сравнительная оценка процессов газового и флюсового рафинирования, позволяет выделить следующие моменты:

1. Газ используется в процессе рафинирующей обработки только до выхода пузырька из расплава, а флюс при механическом перемешивании постоянно контактирует с расплавленным металлом;

2. При газовом рафинировании неизбежно образуется значительное количество горячих отходящих газов, продукты же флюсовой обработки, в основном твердые, могут быть собраны и переработаны совместно со шлаком;

3. Следует отметить низкий ресурс работы диспергирующих устройств, в то время как механические мешалки зарекомендовали себя, как надежные и простые в эксплуатации устройства.

В настоящее время, повышенное внимание в мировой практике отводится использованию в качестве рафинирующих газофлюсовых смесей (ГФС), что объясняется высокой рафинирующей способностью последних [18, 19]. При обработке газофлюсовыми смесями реализуются все преимущества как флюсового, так и газового рафинирования. Технология газо-флюсовой обработки заключается в следующем: газ поступает в аппарат псевдоожиженного слоя, где происходит смешение газа и флюса — частицы флюса «витают» в газовой струе, после чего смесь через фурму подается в расплав.

Обработка газофлюсовыми смесями позволяет эффективно удалять из расплава водород, оксидные включения и при необходимости натрий.

В настоящее время все возрастающую роль в развитии и совершенствовании эффективных способов очистки расплавов от вредных примесей играют методы, которые обеспечивают одновременное (комплексное) удаление из расплава широкой гаммы примесей, в частности водорода и оксидных включений.

Технологические решения в этом направлении характеризуются рядом конструктивных особенностей, связанных с необходимостью эксплуатации в комплексе с агрегатами полунепрерывного и непрерывного литья.

На рисунке 10 представлена схема установки рафинирования в потоке алюминиевого расплава путем фильтрования через гранулированный оксид алюминия с одновременной непрерывной продувкой нейтральным газом [20]. Гранулы Al_2O_3 диаметром 15-20 мм в нижнем слое (высотой 50-100 мм) и 3-8 мм в верхнем слое (высотой 150-200 мм).

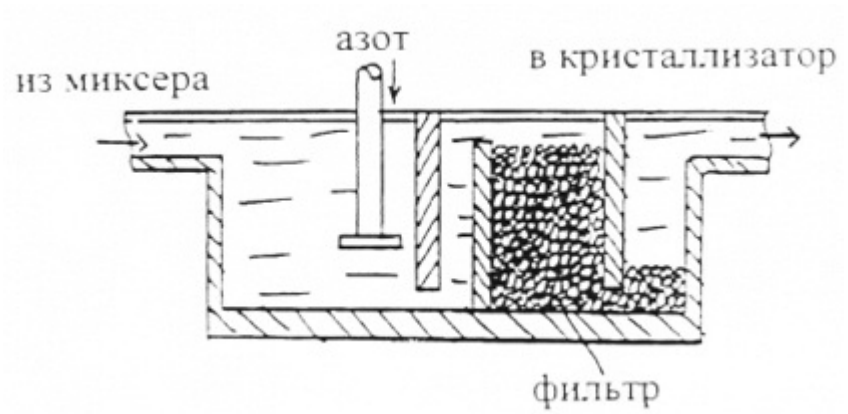

Рисунок 10 — Схема установки для дегазации алюминиевых расплавов нейтральными газами с фильтрованием через оксид алюминия.

Осуществление рафинирующей обработки в потоке для литейных сплавов представляет достаточно сложную задачу в организационном плане, поэтому комплексную обработку можно осуществить посредством последовательной обработки расплава.

В качестве примеров последовательной обработки можно представить следующие: фильтрование расплава через различные фильтры при переливе из плавильной печи в транспортно-разливочный ковш с последующей обработкой расплава продувкой газовой или газофлюсовой смесью в этом же ковше; флюсовая обработка расплава в индукционной печи с последующим фильтрованием при переливе в ковш; флюсовая обработка в ковше и разливка через пенокерамический фильтр, установленный в том же ковше.

Следует отметить, что большое многообразие методов обработки расплава в жидком состоянии нередко затрудняет выбор наиболее оптимального применительно к условиям производства и требованиям к качеству металла.

Заключение

Анализ литературного материала по вопросу рафинирования алюминия и его сплавов от водорода и неметаллических примесей позволяет сделать следующие выводы:

1. Показано, что для алюминиевых сплавов наиболее вредными примесями, оказывающими отрицательное влияние на эксплуатационные свойства изделий, является водород и оксид алюминия. Основные существующие способы рафинирования этих сплавов заключаются в применении продувки расплавов газами (нейтральными, активными и их смесями), флюсовой обработки расплава и фильтрования, а также различных комбинаций этих способов.

2. Установлено, что наиболее простым способом обработки алюминиевых сплавов в печи (ковше) является флюсовая обработка.

3. Анализ существующих методов обработки расплавов алюминиевых сплавов показывает, что обработка с целью удаления неметаллических включений производится с использованием всех сред.

4. Установлено, что при непрерывной обработке расплавов в потоке легко удается объединить как во времени, так и в пространстве дегазацию с удалением неметаллических включений за счет использования газофлюсовых смесей и фильтрования.

5. Данные литературных источников свидетельствуют о том, что наиболее широкое распространение получили способы фильтрования через фильтры из пенокерамики ПКФ, которые все чаще вытесняют сетчатые, зернистые и др. фильтры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах : Добаткин В.И. [и др.] — Москва : Металлургия, 1976. — 263 с.
2. Бондарев, Б.И., Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов : Бондарев Б.И., Напалков В.И., Тарарышкин В.И. — Москва : Металлургия, 1979. — 223 с.
3. Лигатуры для производства алюминиевых и магниевых сплавов : Напалков В.И. [и др.] — Москва : Металлургия, 1983. — 158 с.
4. Курдюмов А.В. Флюсовая обработка и фильтрование алюминиевых расплавов / Курдюмов А.В. — Москва : Металлургия, 1980. — 196 с.
5. Плавка и литье алюминиевых сплавов / Альтман М.Б. [и др.] ; Справочное руководство — Изд.

2-е, перераб. и доп.— Москва : Металлургия, 1983. — 352 с.
6. Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов / Новиков И.И. — Москва : Наука, 1966. — 124 с.
7. Макаров Г.С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами / Макаров Г.С. — Москва : Металлургия, 1977. — 240 с.
8. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов / Гуляев Б.Б. — Ленинград : Машиностроение, 1976. — 214 с.
9. Гуляев Б.Б. Литейные процессы / Гуляев Б.Б. ; М.-Л., Машгиз, 1960. — 416 с.
10. Мондольф Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Мондольф Л.Ф. — Москва : Металлургия, 1979. — 640 с.
11. Гохштейн М.Б. Рафинирование первичного алюминия от оксидных включений / Гохштейн М.Б., Морозов Я.И. — Москва : Металлургия, 1979. — 80 с.
12. Кадышева Г.И. Рафинирование сплава АМг6 продувкой смесями аргона и хлора / Кадышева Г.И., Боргояков М.П., Нагибин В.А., Бюл. ВИЛС Технология легких сплавов, 1982. — С. 13-16
13. Минц Д.М. Теоретические основы очистки воды (технология) / Минц Д.М. — Москва : Стройиздат, 1964. — 156 с.
14. Фильтрация расплава через пенокерамические фильтры при выплавке жаропрочных сплавов в печах ИСВ / Офицеров А.А. [и др.], Бюл. ВИЛС Технология легких сплавов, № 6, 1992. — С. 23-25.
15. Постников Н.С. Прогрессивные методы плавки и литья алюминиевых сплавов / Постников Н.С., Черкасов В.В. — Москва : Металлургия, 1973. — 244 с.
16. Металлические примеси в алюминиевых сплавах / Курдюмов А.В. [и др.] — Москва : Металлургия, 1988. — 144 с.
17. Альтман М.Б. Металлургия литейных алюминиевых сплавов / Альтман М.Б. — Москва : Металлургия, 1972. — 152 с.
18. Васильев В.А. Рафинирование первичного алюминия от натрия газопорошковой смесью углеродистый материал — инертный газ : автореф. дисс. канд. техн. наук / Васильев Валерьян Анатольевич — Ленинград, 1986.
19. Кузьмичев Л.В. Рафинирование алюминиевых сплавов продувкой смесью газа с флюсом / Кузьмичев Л.В., Малиновский Р.Р. // Цветные металлы, № 8, 1973. — С. 43–45.
20. Горохов В.П. Промышленное внедрение непрерывного рафинирования алюминиевых сплавов продувкой азотом и фильтрацией через гранулированную окись алюминия / Горохов В.П., Ливанов В.А. // Цветные металлы, № 5, 1974. —С. 50–52.
21. Напалков В.И. Исследование влияния добавок титана и бора на структуру слитков алюминиевых сплавов / Напалков В.И., Бюл. ВИЛС Технология легких сплавов, № 3, 1977. — С. 14–16.
22. Туркина Н.И. Фазовые взаимодействия в системе A1-Mg-Sc / Туркина Н.И., Кузьмина В.И. // Изв. Ан СССР, Металлы, 1976. — С. 208-212.
23. О механизме образования интерметаллидов и их превращениях в процессе приготовления и использования лигатур A1-Ti-B и A1-Ti / Тепляков Ф.К. [и др.] // Цветные металлы, № 9, 1991, 54-55 с.
24. Особенности взаимодействия жидкого алюминия с фтористыми солями тугоплавких металлов / Напалков В.И., Тарарышкин В.И., Белко С.Ю. // Бюлл. ВИЛС Технология легких сплавов, № 8, 1980. — С. 19-23.
25. Reviews on the Influences of Alloying elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys and Aluminum Alloy Composite / R.S. Rana, Rajesh Purohit // International Journal of Scientific and Research Publications, India. Vol. 2, 2012
26. DC casting of aluminium: process behaviour and technology / Grandfield, J.F. and McGlade, P.T. //

Materials Forum, Australia. Vol. 20, 1996. — P. 29-51.
27. Янко Э.А. Производство алюминия / Э.А. Янко / СПб.:Изд-во Сю-Петерб. Ун-та, 2007. — 304 с.
28. Faunce J. New Casting Method for Improving Billet Quality / Faunce, J P; Wagstaff, F E; Shaw, H. // Light Metals, Los Angeles, Calif; U.S.A; 27 Feb.-1 Mar. 1984. — P. 1145-1158.
29. Buxmann K. Solidification Conditions and Microstructure in Continuously Cast Aluminum / Buxmann, K and Gold, E. // J. Met. Vol. 34, no. 4, Apr. 1982. — P. 28-34.
30. Bunn A. Grain refinement by Al-Ti-B alloys in aluminium melts: a study of the mechanisms of poisoning by zirconium / Bunn, A. M, Schumacher, P, Kearns M. A, Boothroyd, C. B, and Greer, A. L. // Materials Science and Technology (UK). Vol. 15, no. 10, Oct. 1999. — P. 1115-1123.
31. Kashyap K. Effects and mechanisms of grain refinement in aluminium alloys / Kashyap, K T; Chandrashekar, T. // Bulletin of Materials Science (India). Vol. 24, no. 4, Aug. 2000. — P. 345-353.
32. Mohanty P. Mechanism of grain refinement in aluminum / Mohanty P.S, Gruzleski, J.E. // Acta Metall. Mater. Vol. 43, no. 5, May 1995 — P. 2001-2012.
33. Greer A. Modelling of grain refinement in directional solidification / Greer, A.L., Quested, T.E., and Spalding, J.E. // Light Metals 2002 as held at the 131st TMS Annual Meeting; Seattle, WA; USA; Feb. 2002. — P. 687-694.
34. Stefanescu. Solidification Structures of Aluminum Alloys / Stefanescu, Doru M; Ruxanda, Roxana // Materials Park, OH: ASM International, 2004. — P. 107-115.
35. Lessiter M. Understanding Inclusions in Aluminum Castings / Lessiter, M J. // Modern Casting (USA). Vol. 83, no. 1, Jan. 1993. — P. 29-31.
36. Eckert C. Molten Aluminum Filtration: Fundamentals and Models / Eckert, C E; Miller, R E; Apelian, D; Mutharasan, R. // Light Metals 1984; Los Angeles, Calif ; U.S.A ; 27 Feb.-1 Mar. 1984. — P. 1281–1304.
37. Doutre D. Aluminum Cleanliness Monitoring: Methods and Applications in Process Development and Quality Control / Doutre D., Gariepy B., Martin J. P and Dube, G. // Light Metals 1985; New York, New York; USA; Feb. 1985. — P. 1179–1195.
38. Simensen C. Survey of Inclusions in Aluminum / Simensen, C.J and Berg, G. A // Aluminium. Vol. 56, no. 5, May 1980. — P. 335–338.
39. Apelian D. How clean is the metal you cast? / Apelian, D. // The issue of assessment; a status report. 3rd International Conference on Molten Aluminum Processing, Florida; USA; Nov. 1992. — P. 1–15.
40. Eckert C. The origin and identification of inclusions in foundry alloys / Eckert, C.E. // 3rd International Conference on Molten Aluminum Processing; Orlando, Florida; USA; Nov. 1992. — P. 17–50.
41. Производство отливок из сплавов цветных металлов / Курдюмов А.В. [и др.]. Учебник для вузов — Москва : Металлургия, 1986. — 416 с.
42. Apelian D. Filtration: a melt Refining Method / Apelian, D and Mutharasan, R. // J. Met. Vol. 32, no. 9, Sept. 1980. — P. 14-18.
43. Gallo R. Correlating Inclusion Sizes with Aluminum Casting / Gallo, R. // Modern Casting. Vol. 94, no. 6, June 2004. — P. 27-30.
44. Martins L. Inclusion Removal by Flotation and Stirring / Martins, L. C. B., and Sigworth, G. K. // 2nd International Conference on Molten Aluminum Processing; Florida; Nov. 1989. — P. 16.1-16.28.
45. Groteke D. Influence of SNIF Treatment on Characteristics of Aluminum Foundry Alloys / Groteke, D.E. // Transactions of the American Foundrymen's Society, Vol. 93; Pittsburgh, Pennsylvania; USA; 29 Apr.-3 May 1985. — P. 953-960.
46. Schmahl J. Recent Advances in Molten Aluminum Filtration Technology / Schmahl, J.R. Aubrey L. S. and Martins, L.C.B. // 4th International Conference on Molten Aluminium Processing; Orlando, FL; USA; Nov. 1995. — P. 71-102.