

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Факультет материаловедения и металлургических технологий
Кафедра пирометаллургических и линейных технологий

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

(должность)
_____/_____
(подпись) (И.О.Ф.)
«__»_____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор
_____/Б.А. Кулаков/
«__»_____ 2017 г.

Производство алюминиевых отливок по газифицируемым моделям
по дисциплине металлургия цветных металлов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-22.04.02.2017. .ПЗ ВКР

Консультант

(должность)
_____/_____
(подпись) (И.О.Ф.)
«__»_____ 2017 г.

Руководитель работы

(должность)
_____/_____
(подпись) (И.О.Ф.)
«__»_____ 2017 г.

Консультант

(должность)
_____/_____
(подпись) (И.О.Ф.)
«__»_____ 2017 г.

Автор работы

студент группы _____

(должность)
_____/_____
(подпись) (И.О.Ф.)
«__»_____ 2017 г.

Консультант

(должность)
_____/_____
(подпись) (И.О.Ф.)
«__»_____ 2017 г.

Нормоконтролер

(должность)
_____/_____
(подпись) (И.О.Ф.)
«__»_____ 2017 г.

Челябинск 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	8
2. ПЛАВКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	13
2.1 Особенности технологических процессов плавки алюминиевых сплавов.....	13
2.2 Печи для плавки алюминиевых сплавов	17
3. ВНЕПЕЧНАЯ ОБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	25
3.1 Рафинирование.....	25
3.1.1 Очистка алюминиевых сплавов продувкой газами.....	27
3.1.2 Очистка расплава фильтрованием	34
3.1.3 Вакуумирование жидкого металла.....	37
3.1.4 Рафинирование расплава солевыми композициями.....	39
3.1.5 Рафинирование металлом-геттером.....	45
3.1.6 Рафинирование газофлюсовой смесью.....	46
3.1.7 Электровакуумное рафинирование	48
3.2. Модифицирование алюминиевых сплавов.....	49
4 . ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫХ МОДЕЛЯМ.....	54
4.1 Схема технологического процесса.....	54
4.2 Совершенствование газифицируемых моделей	56
4.2.1 Процессы получения газифицируемых моделей.....	56
4.2.2 Анализ и сравнение свойств материалов для газифицируемых моделей.....	61
4.2.3 Преимущества сополимера полиметилметакрилата с полистиролом.....	65
4.3 Технологический процесс изготовления отливки «Корпус».....	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	79
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	81

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

ВВЕДЕНИЕ

Производство металлов и сплавов является основой развития всех отраслей народного хозяйства. Наиболее широко сплавы используют в машиностроении, авиации и космической технике, металлургии, радиотехнике, электронике, химической промышленности и др. Сплавы, применяемые для изготовления литых изделий, имеют различные физические и физико-химические свойства. Эти свойства в значительной степени зависят от металла, химического состава сплава и последующей технологии получения из него изделий.

Различают литейные и деформируемые сплавы. Литейные сплавы предназначены для получения фасонных отливок, а деформируемые – для литья слитков, из которых посредством обработки давлением получают различные изделия. Из сплавов цветных металлов широкое применение получили сплавы на основе алюминия, магния и меди. Основными особенностями этих сплавов являются высокая удельная прочность, пластичность и хорошая коррозионная стойкость.

Технология получения различных сплавов и отливок из них имеет свои особенности, обусловленные не только физико-химическими свойствами сплава, но и условиями эксплуатации литых изделий. Качество приготовленного сплава зависит от многих факторов, среди которых первостепенное значение имеют: выбор оптимального соотношения компонентов сплава (даже в пределах, устанавливаемых ГОСТ или иным стандартом), плавильной печи и ее футеровки, правильное составление и подготовка шихтовых материалов, а также эффективность рафинирующих и модифицирующих средств.

Современную жизнь невозможно представить без алюминия. Этот блестящий легкий металл, прекрасный проводник электричества, получил самое широкое применение в различных отраслях производства. Между тем известно, что в свободном виде алюминий не встречается в природе, и вплоть до XIX века наука даже не знала о его существовании.

Только в последней четверти XIX века была разрешена проблема

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

промышленного производства металлического алюминия в свободном виде. Это стало одним из крупнейших завоеваний науки и техники этого периода, значение которого мы, может быть, еще не оценили до конца.

Несмотря на то, что алюминий научились добывать сравнительно недавно, он успел стать востребованным и необходимым сырьем для многих отраслей промышленности. Из алюминия и сплавов на его основе делают корпуса самолетов и космических кораблей, железнодорожные вагоны, кузова автомобилей и даже броню для бронетранспортеров.

Степень очистки промышленного алюминия, полученного электролизом, составляет 99,5–99,8%, казалось бы, это довольно высокая чистота, но даже незначительное количество примесей существенно снижают его технические параметры, поэтому из промышленного алюминия или отходов металла путем рафинирования получают еще более чистый алюминий (99,99%).

Алюминий и его сплавы по объемам производства и потребления занимают второе место после стали. Потребление алюминия имеет тенденцию постоянного роста, поэтому его производство развивается опережающими темпами. Широкое использование алюминиевых сплавов в различных отраслях народного хозяйства связано с тем, что важнейшим их преимуществом является высокая технологичность.

Данное обстоятельство при использовании алюминиевых сплавов позволяет применять наиболее производительное оборудование и новейшие технологии, обеспечивающие качественное изготовление деталей. Расчеты показывают, что несмотря на высокую стоимость алюминия и новейшего используемого оборудования, затраты на изготовление продукции из алюминиевых сплавов, полностью окупаются и дают значительный эффект, в первую очередь при организации крупносерийного производства.

По оценкам специалистов [3] к 2030 году потребление алюминия в мире может возрасти до 50 млн. т, из которых 22–24 млн. т составит рециклированный алюминий. При этом резко возрастает необходимость разработки и использования

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

более совершенного оборудования, которое позволяют уменьшить безвозвратные потери металла, сократить энергозатраты при выплавке высококачественных сплавов, снизить загрязнение окружающей среды.

Теория процессов плавки литейных сплавов, охватывающая общие принципы плавки в литейном производстве, изучение особенностей строения и свойств исходных веществ, анализ термодинамики механизма и кинетики процессов, лежит в основе выбора исходных материалов для плавки и ее технологии, т. е. совокупности операций, обеспечивающих протекание требуемых процессов в плавильном агрегате и получение качественных отливок с заданными свойствами. Эта теория базируется на физико-химических основах литейного производства и теории металлургических процессов.

Цель диссертации – повышение качества отливок из алюминиевых сплавов по газифицируемым моделям, снижение трудоемкости их изготовления.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Перспективы развития литейного производства определяются потребностью в литых заготовках, их динамикой производства, авторитетом литейных технологий и конкурентной способностью среди развитых зарубежных стран.

Россия по объемам производства литья занимает 6-е место после Китая, США, Индии, Германии и Японии. В последние годы производство отливок в России из черных и цветных сплавов стабилизировалось на уровне 4,2 – 4,4 млн. тонн. Литье по газифицируемым моделям составляет около 1 % от общего объема литья{1}.

В настоящее время экспорт отливок составляет 30 тыс. тонн в год в такие страны, как Германия, Англия, Франция, Израиль, Швеция, Норвегия, Финляндия, импорт составляет около 70 тыс. тонн.

Литейное производство выгодно отличается от других заготовительных производств (паковки, штамповки, сварки) тем, что методом литья возможно изготавливать заготовки, максимально приближенные по геометрии к самым сложным деталям машин. При современных литейных технологиях коэффициент использования металла достигает 95...97 % в цветном литье и более 80 % – в чугунолитейном производстве. Без сомнения, литейное производство и в будущем сохранит лидирующее положение среди заготовительных производств.

Объемы производства литых заготовок находятся в пропорциональной зависимости от объемов производства машиностроительной продукции, так как доля литых деталей в автомобилях, тракторах, комбайнах, танках, самолётах и других машинах составляет 40...50 %, а в металлорежущих станках и кузнечнопрессовом оборудовании доходит до 80 % массы и до 25 % стоимости изделия. Для получения цветных сплавов применяются электрические индукционные, дуговые и печи сопротивления, газовые и мазутные печи.

Перспективными являются технологические процессы плавки в индукционных печах средней частоты, обеспечивающих стабильно заданный химсостав и температуру нагрева расплава для проведения эффективной

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

внепечной обработки.

Достижение и развитие литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) связано с достижениями и успехами химии пенопластов. Промышленное производство ЛГМ началось в начале шестидесятых годов прошлого века {2}. Сначала способ применялся в единичном производстве крупных отливок массой 13 тонн. Процесс литья по ЛГМ стали осваивать кроме США литейщики других стран Германии, Англии, Франции, Японии, СССР. Производителей привлекло снижение трудоёмкости процесса формовки, повышение геометрической точности отливок, снижение их массы, отсутствие стержней и операции сборки форм.

Способ ЛГМ сокращает затраты на оборудование и материалы, уменьшает число технологических операций и снижает отходы производства. Высокое качество модели позволяет уменьшить затраты на финишные операции [2].

По мнению Президента Российской ассоциации литейщиков Диброва И.А. [3] освоение технологического процесса производства отливок по газифицируемым моделям позволяет повысить точность отливок на 2–3 класса, снизить массы отливок на 15 %, снизить в 2 раза трудоёмкость при механической обработке отливок, уменьшить в 5 раз расход формовочных материалов. Капитальные затраты при строительстве нового цеха сокращаются в 1,5...2 раза, производственные площади уменьшаются в 2...2,5 раза, грузопотоки в цехе сокращаются в 2 раза.

Данная технология решает и экологическую проблему, т.к. исключаются такие пыле- и газообразующие производства, как приготовление формовочных и стержневых смесей, изготовление стержней, выбивка форм. Выделяемые газообразные продукты газификации модели легко удаляются системой вакуумирования.

Дальнейшее развитие ЛГМ будет связано с повышением производительности труда за счёт механизации и автоматизации технологических операций, расширением номенклатуры литья, максимальным приближением отливки по размерам и массе к готовой детали, увеличением технологического

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

выхода годного (ТВГ) путём снижения расхода металла на прибыли и литниковые системы, более широким применением отечественных материалов, улучшением экологической обстановки на производственных участках. Это, в свою очередь, позволит выдержать жёсткую конкуренцию со стороны Китая, Индии, Турции, но при условии улучшения инвестиционного климата в литейном производстве.

В работе [4] изучен процесс охлаждения отливки в процессе заполнения формы при литье по газифицируемым моделям. Целью исследования являлись расчет охлаждения металла при взаимодействии его с пенополистиролом в одномерном случае и анализ заполняемости формы металлом при заливке модели.

В результате проведено исследование охлаждения жидкого металла в процессе заполнения формы при литье по газифицируемым моделям на основе анализа решения уравнения теплопроводности при термодеструкции материала модели. Показано, что кристаллизация металла распространяется сверху вниз и интенсивность охлаждения повышается при увеличении скорости заливки и снижении величины разрежения в опоке.

Предложено уравнение для расчета температуры поверхности металла, учитывающее энергию термодеструкции материала модели, скорость заливки, начальную температуру металла, разрежение в опоке и площадь поперечного сечения отливки при литье по газифицируемым моделям.

Авторы делают следующие важные выводы:

– энергия термодеструкции пенополистирола при литье по газифицируемым моделям линейно возрастает при повышении температуры заливки;

– уравнение теплопроводности удовлетворительно описывает процесс охлаждения металла при заливке методом ЛГМ;– применение вакуума приводит к существенному улучшению заполняемости формы металлом, что связано с увеличенным истечением продуктов газификации модели за счет большего перепада давлений;

– при ЛГМ охлаждение отливки начинается с ее верхней части и в ряде

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

случаев кристаллизация может распространяться сверху вниз; полученные соотношения на основании решения уравнения теплопроводности позволяют проводить оценочные расчеты технологических параметров литья в целях получения более плотных отливок и определять заполняемость формы.

Наряду с активным применением компьютерного моделирования для описания процессов, протекающих при ЛГМ, в настоящее время активно внедряются аддитивные технологии для изготовления пенопластовых моделей на 3D-фрезерах по компьютерным программам [5], включая моделирование решетчатых отливок с использованием объемных сборных структур с повторяющимися унифицированными элементами, пенопластовые модели которых можно изготовить на пластавтоматах либо на 3D-фрезерах.

В работе [6] авторы разработали метод измерения степени плавления вспененных гранул пенополистирола и газифицируемой модели. Метод подразумевает использование экспериментальных данных по прочности газифицируемых моделей. В ходе эксперимента модели изготавливали из гранул с различным уровнем вспенивая. Поверхность разрушения образцов анализировали цифровым способом. Результаты показали хорошую корреляцию между прочностью на растяжение пенополистироловой модели и степенью плавления гранул.

В экспериментальных исследованиях иранского университета «Sharif University of Technology» [7] методом фотонаблюдения был изучен процесс заполнения силумином, сталью и чугуном формы с газифицируемой моделью. В ходе исследования отслеживали длину газового промежутка между расплавом и моделью, процесс разложения модели, слой расплава, контактирующего с пенополистиролом и время заполнения формы.

Установлено, что время заполнения формы определяется тремя параметрами: температура заливки расплава, плотность пенополистирола и толщина противопопригарной краски. Для стали наблюдаемые параметры больше, чем для чугуна. Для стали и чугуна пенополистирол при выжигании полностью

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

газифицируется, а для силумина он разлагается в виде жидкой фазы и, соответственно, газовый зазор отсутствует.

Установлено, что чем выше плотность пенополистирола, тем выше давление образующихся газообразных продуктов его распада.

Необходимо отметить, что в последние годы качество литья значительно повысилось, увеличилась размерная точность и, соответственно, уменьшилась их масса, повысились прочностные и эксплуатационные характеристики, улучшился товарный вид.

За последние годы меняются приоритеты в развитии технологических процессов литейного производства в сторону их совместимости с окружающей средой. На первый план выходят экологические аспекты производства, которые определяются вредными выбросами в атмосферу, жёстко регламентируемыми Киотским протоколом.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

2. ПЛАВКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

2.1 Особенности технологических процессов плавки алюминиевых сплавов

Алюминий и его сплавы по объемам производства и потребления занимают второе место после стали.

Потребление алюминия имеет тенденцию постоянного роста, поэтому его производство развивается опережающими темпами. Широкое использование алюминиевых сплавов в различных отраслях народного хозяйства связано с тем, что важнейшим их преимуществом является высокая технологичность. Данное обстоятельство при использовании алюминиевых сплавов позволяет применять наиболее производительное оборудование и новейшие технологии, обеспечивающие качественное изготовление деталей.

Алюминиевые сплавы широко применяют в авиационной, автомобильной, тракторной промышленности и других отраслях народного хозяйства.

Они обладают высокой прочностью, хорошими литейными свойствами, коррозионной стойкостью, высокими теплопроводностью и электрической проводимостью. Из алюминиевых сплавов можно изготавливать сложные прочные и плотные отливки; лёгкие, с хорошей обрабатываемостью.

Алюминий относится к лёгким и одновременно к легкоплавким металлам. Температура плавления чистого алюминия при атмосферном давлении равна 658 °С. Плотность его при комнатной температуре 2,7 г/см³ [8].

Особенность алюминиевых расплавов – повышенная склонность их к газонасыщению, главным образом при температуре плавки, и высокая химическая активность. Поэтому алюминиевые расплавы необходимо предохранять и очищать от газовых и неметаллических включений.

Для улучшения качества алюминиевых сплавов производят их дегазацию путём продувки различными газами, не растворимыми в этих сплавах. Одновременно происходит очистка сплавов от неметаллических включений [9].

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

Качество алюминиевых сплавов обычно повышают за счёт их модифицирования.

В современных литейных цехах алюминиевые сплавы плавят в электрических печах сопротивления и индукционных канальных печах. Чтобы предохранять металл от насыщения водородом, из влаги шихтовых материалов, последние просушивают, предварительно очищают и переплавляют. В процессе плавки применяют защитные флюсы. Широко применяют рафинирование жидкого металла.

Наиболее распространёнными способами рафинирования алюминиевых сплавов являются обработка рафинирующими флюсами, продувка газами и фильтрация.[10]

Для предохранения расплавленного металла от взаимодействия с атмосферой печи применяют покровные флюсы. Покровные флюсы вводят в печь при загрузке шихты. Рафинирующие флюсы можно вводить непосредственно на поверхность расплава в ковше или тигле раздаточной печи, но более эффективно введение их в расплав при помощи колокольчика.

Особую группу составляют универсальные флюсы, обработка которыми позволяет совместить рафинирование и модифицирование сплавов. Их модифицирующее действие объясняется наличием NaF, содержание которого может достигать до 60%.[11, 12, 13]

Рафинирование газами производят при температуре 710–730 °С в течение 5–20 минут. Обработка хлором – процесс эффективный. Однако хлор токсичен. В связи с этим алюминиевые расплавы обрабатывают чаще хлоридами (хлористым цинком, хлористым марганцем, гексохлорэтаном и др.), которые вводят в расплав в колокольчике.

Особенно удобно использовать таблетки «Дегазер», которые содержат гексохлорэтан (C₂Cl₆) и хлористый барий (10% по массе). Расход гексохлорэтана составляет 0,3–0,7 % при температуре расплава 740–750 °С.

Из физических свойств алюминия следует отметить высокие теплоемкость,

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

теплопроводность и скрытую теплоту плавления. В связи с этим плавление алюминия и его сплавов является довольно энергозатратной операцией. Количество теплоты, необходимой для нагрева и расплавления 1 кг алюминия (660 °С) сопоставимо с теплотой, затрачиваемой на расплавление такого же количества чугуна (1250 °С).

Малое удельное электросопротивление алюминия уменьшает тепловой КПД индукционных печей.

Процесс плавления алюминиевых сплавов ускоряется при погружении шихты в расплав, когда одновременно с прогревом шихты идет ее растворение в расплаве. Трудность растворения в алюминии других более тугоплавких элементов вызывает необходимость использования лигатур.

Главные сложности при плавке вызывает повышенная химическая активность алюминия, особенно высокое сродство к кислороду. Алюминий и его сплавы склонны к взаимодействию с газами печной атмосферы, огнеупорными материалами и флюсами.

При плавке на воздухе алюминиевые сплавы окисляются, и на поверхности твердого и жидкого алюминия образуется плотная, прочная пленка

Al_2O_3 толщиной от 0,1 до 10 мкм в зависимости от времени и температуры. Основными окислителями являются кислород воздуха и пары воды.

Плавку и заливку алюминия производят при строгом соблюдении температурного режима и постоянном и точном контроле нагрева сплава. Даже незначительный перегрев и излишнее выдерживание сплава при высокой температуре ведут к чрезмерному насыщению его газами и окислами и появлению усадочных раковин.

Для удаления окислов и шлаков необходимо применять флюсы, действующие как химически, так и механически. После очистки расплава от окислов не следует его перемешивать.[12.13.14.15]

Разливку надо производить осторожно, короткой струей.

При приготовлении алюминиевых сплавов следует придерживаться такого

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

порядка:

- расплавление около 2/3 чушкового алюминия;
- присадка и расплавление лигатуры;
- присадка остального чушкового алюминия;
- присадка отходов и литников;
- очистка расплава от окислов после его расплавления путем добавки очистительных флюсов и хорошего перемешивания;
- выемка тигля и снятие шлака и окислов (не следует снимать шлак во время плавки, так как поверхностная пленка окислов защищает расплав от дальнейшего окисления);
- выдерживание расплава перед заливкой до требуемой температуры

Основные технологические этапы алюминиевого литейного цеха показаны схематически на рисунке 2.1.

Некоторые технологические операции прямо связаны с образованием шлака. Любая технологическая операция, которая вызывает турбулентность течения металла, всплески металла или захват расплавом воздуха дает вклад в образование шлака.

Производство первичного алюминия

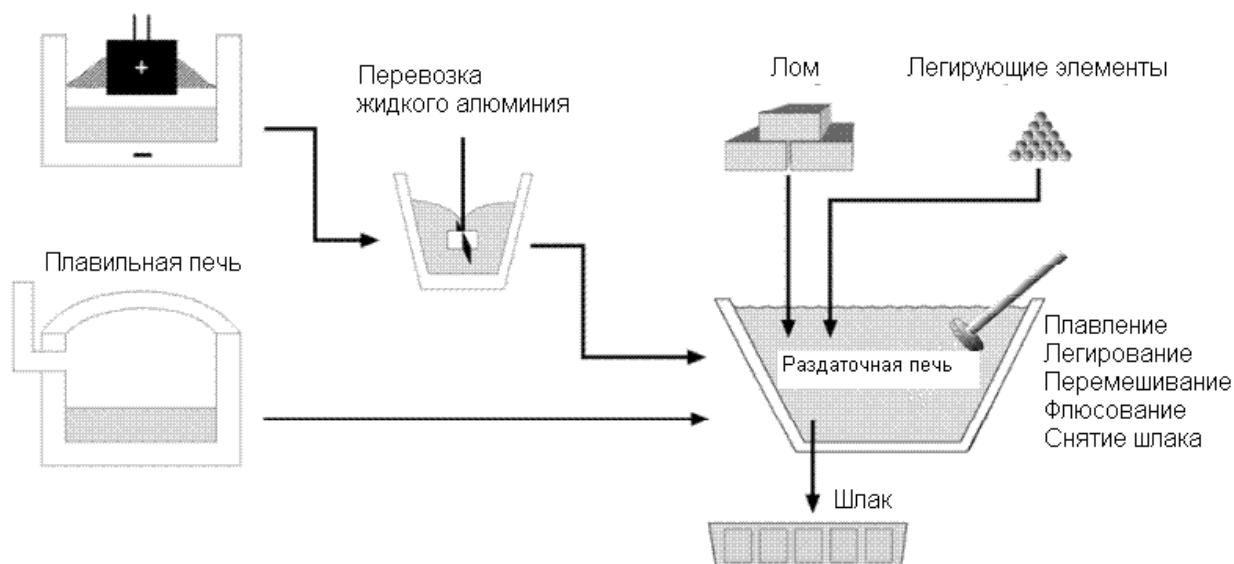


Рисунок 2.1 – Технологические этапы в алюминиевом литейном цехе

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

Расчеты показывают, что несмотря на высокую стоимость алюминия и новейшего используемого оборудования, затраты на изготовление продукции из алюминиевых сплавов, полностью окупаются и дают значительный эффект, в первую очередь при организации крупносерийного производства.

2.2. Печи для плавки алюминиевых сплавов

Выбор типа печей осуществляется в зависимости от масштабов производства, характера литья (требований к качеству отливки) и энергетических возможностей.

Наиболее важными проблемами выплавки алюминиевых сплавов с позиций ресурсосбережения на современном этапе являются:

- сокращение безвозвратных потерь металла;
- экономия энергетических затрат;
- повышение производительности труда;
- сокращение до минимума вредных выбросов в атмосферу, что исключает необходимость строительства дорогостоящих систем пылегазоочистки[10].

В настоящее время наиболее широкое распространение для плавки алюминиевых сплавов получили пламенные отражательные и индукционные печи. Плавка алюминиевых сплавов может производиться в разнообразных электрических и топливных печах.

Топливные печи могут быть тигельными, отражательными и шахтными. Наибольшее применение для алюминиевых сплавов нашли тигельные и ванные печи на газовом и жидком топливе. При небольших объемах производства удобно использовать тигельные поворотные печи с мазутным или газовым обогревом. В них можно легко перейти от приготовления одного сплава к другому, провести рафинирование и модифицирование.

В этих печах происходит минимальный угар металла (0,5 – 1,0 %). К недостаткам можно отнести малый тепловой КПД и необходимость частой замены

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

тиглей. Тигельные топливные печи (рисунок 2.2) состоят из следующих элементов: металлического корпуса 1, горелок или форсунок 2 и плавильного тигля 3. Корпус печи защищен теплоизоляционным слоем и огнеупорной кладкой.

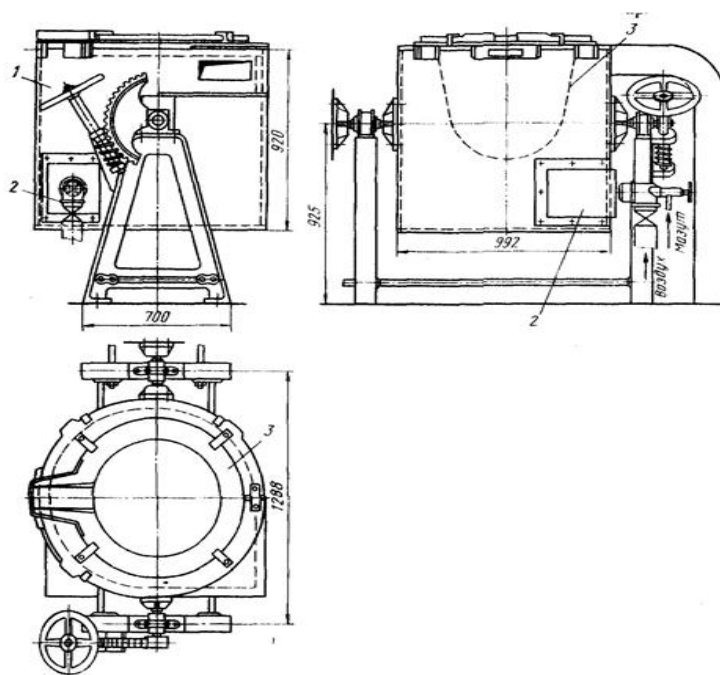


Рисунок 2.2 – Поворотная тигельная печь

Над печью устанавливают вытяжной зонг для отвода дымовых газов. Для слива металла корпус имеет ручное поворотное устройство.

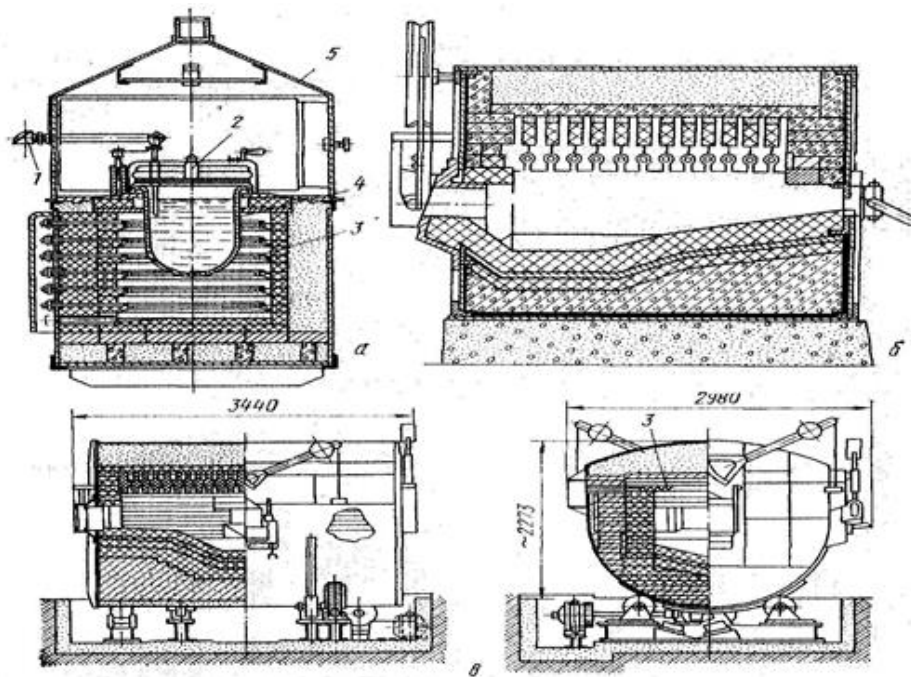
Тигельные топливные печи также применяют для плавки магниевых, медных, цинковых и других сплавов.

К недостаткам пламенных отражательных печей можно отнести: большие капитальные затраты при их строительстве, включая строительство газопровода или мазутохранилища, подъездных путей, систем пылегазоочистки; значительное выделение тепла и продуктов сгорания в систему эвакуации печных газов и в атмосферу; возможные выбросы металла при загрузке в печь влажной шихты; низкая стойкость подина из-за значительных ударных нагрузок при завалке шихты, резких теплосмен; значительные безвозвратные потери металла от 2 % и более; высокая насыщенность расплавов газами и неметаллическими включениями.

Из электрических печей для плавки алюминиевых сплавов подходят тигельные или отражательные печи (электросопротивления) и индукционные печи.

						22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			18

Тигельные печи сопротивления типа САТ (рисунок 2.3, а) используют для плавки небольших количеств (до 250 кг) алюминиевых сплавов. Чаще всего их применяют в качестве плавно-раздаточных для поддержания температуры металла во время разливки по формам. Нагреватели печей САТ изготовляют из нихромовой проволоки.



Рисунке 2.3 – Электрические печи сопротивления для плавки алюминиевых сплавов: а – тигельная печь типа САТ; б – отражательная печь типа САК; в – отражательная печь типа САН; 1 – термопара; 2 – крышка; 3 – нагреватели; 4 – тигель; 5 – вытяжной зонт

В камерных отражательных печах типа САК (рисунок 2.3, б) емкостью до 650 кг нагревательные элементы из нихрома или карборунда установлены в своде печи. Разбор металла производится через рабочее окно. Шихта загружается с противоположной стороны.

Электropечи типа САН (рисунок 2.3, в) наиболее металлоемкие (до 3000 кг). Они имеют механизм наклона для слива металла через сливной носок. Нагреватели изготовляют из нихромовой проволоки. Эти печи отличаются большой производительностью. Их экономически выгодно использовать при

крупносерийном и массовом производстве, а также при переплаве отходов. Доводку и рафинирование сплавов осуществляют в раздаточных печах малой емкости.

Отражательные электрические печи, по сравнению с пламенными, имеют более ограниченное применение, так как они не отвечают современным требованиям, как по производительности, так и по уровню механизации, высоким затратам электроэнергии. В настоящее время в основном печи сопротивления используются в качестве миксеров.

Прогрессивным способом плавки алюминиевых сплавов в литейных цехах с серийным производством является индукционный нагрев токами промышленной, средней и высокой частоты. Для алюминиевых сплавов наиболее подходят открытые индукционные тигельные печи. Они имеют следующие преимущества:

1. высокая производительность;
2. интенсивная циркуляция расплава в тигле, обеспечивающая выравнивание температуры и химического состава по всему объему ванны;
3. возможность проведения плавки при любом давлении (от атмосферного до вакуума) и в любой атмосфере (окислительной, восстановительной или нейтральной);
4. простота и удобство обслуживания печи, управления и регулирования процессом плавки;
5. хорошие санитарно – гигиенические условия труда.

В настоящее время ряд специализированных отечественных и зарубежных фирм поставляет комплектные индукционные плавильные установки (УИП).[10] Так отечественная группа компаний РЭЛТЕК поставляет установки в состав которых входят: одна или две индукционные плавильные печи (ППИ), двухконтурная станция охлаждения индуктора с ионно-обменным фильтром, пульт дистанционного управления, гидропривод поворота печи, системы контроля футеровки тигля и охлаждающей воды. Если в состав УИП входит одна печь, то комплект электрооборудования включает в себя: устройство ввода

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

высокого напряжения (УВН), силовой трансформатор (Тр), тиристорный преобразователь частоты (ТПЧП) и блок компенсирующих конденсаторов (БК).

Для более гибкого снабжения литейного цеха жидким металлом, повышения коэффициента использования печей и повышения производительности можно реализовать двухпостовую тандемную схему плавки. В этом случае в состав УИП входят две печи. Возможны три варианта электроснабжения тандемной плавки. Наиболее простой из них предусматривает один ТПЧП и дополнительное силовое переключающее устройство (СПУ). Когда в одной печи подготовлен расплав, то электроснабжение переключается на вторую печь. Такая система способствует снижению простоя УИП, производительность возрастает незначительно.

Более производительная работа УИП достигается при наличии второго ТПЧП малой мощности не более 10 % основного канала или при использовании двухэнергоканальных преобразователей частоты, которые дополнительно включают в себя дроссели (ДР) и инверторы (И).

Современные УИП позволяют автоматизировать процесс плавки и вести статистическую обработку параметров процесса плавки. С этой целью предусмотрена возможность постоянного точного взвешивания расплава в печи на любой стадии работы, а значит, регулировать химический состав и осуществлять учет загружаемой шихты и слитого металла.

Печи, входящие в состав УИП, могут иметь емкость от нескольких килограммов до нескольких тонн. Независимо от емкости индукционные тигельные печи имеют одинаковые конструктивные узлы и отличаются мощностью электрооборудования и производительностью. На рисунке 2.4 показана печь ИАТ – 2,5 емкостью 2,5 т.

В связи с высокой химической активностью алюминиевого расплава большое значение уделяется материалам для футеровки и тиглей.

Футеровку отражательных печей выполняют из магнезита или шамота. Для уменьшения взаимодействия с расплавом футеровку покрывают обмазкой из

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

флюса (23 – 25 % Na_3AlF_6 , 20 – 27 % B_2O_3 , ост. NaCl), смешанного с жидкой глиной. Обмазку прокаливают при 900 – 950 °С.

Тигли для плавки алюминиевых сплавов изготавливают из серого или легированного чугуна. Можно использовать и графитошамотные тигли, предназначенные для плавки меди и медных сплавов. Их емкость от 0,5 до 500 марок. Условная единица емкости – марка, показывает объем, занимаемый 1 кг расплавленной меди. Зная плотности меди и сплава, можно определить массу сплава в тигле.

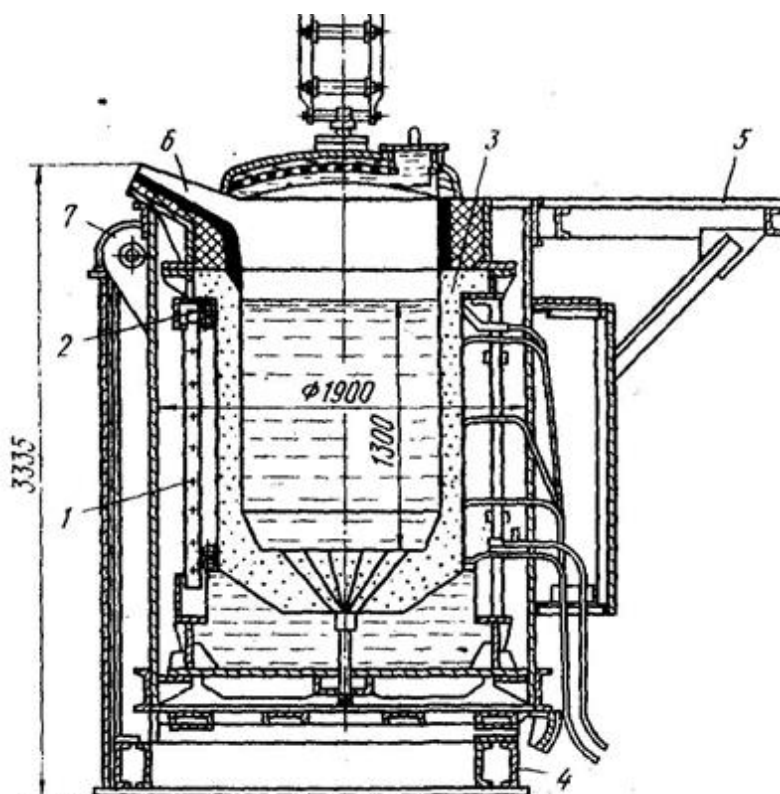


Рисунок 2.4 – Индукционная тигельная печь ИАТ – 2,5 для плавки алюминиевых сплавов: 1 – магнитопроводы; 2 – индуктор; 3 – набивной тигель; 4 – каркас печи; 5 – рабочая площадка; 6 – сливной носок; 7 – ось поворотного устройства

Для защиты от насыщения расплава железом рабочие поверхности литых чугунных тиглей покрывают защитными огнеупорными обмазками, а весь плавильный инструмент – огнеупорными красками.

Для чугунных тиглей применяют обмазку, состоящую из (% по массе): 17 – графита; 18 – огнеупорной глины; 5 – жидкого стекла и 60 – воды. Обмазку

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

наносят слоем толщиной не менее 5 мм

В состав красок для инструмента входят мел, оксид цинка, огнеупорная глина, тальк, коллоидный графит и другие вещества. Чаще всего используют краску, состоящую из 50 частей (по массе) отмученного мела, 50 ч оксида цинка, 5 ч жидкого стекла, 100 ч воды или краску из 32,5 ч отмученного мела или окиси цинка, 1,5 ч жидкого стекла и 66 ч воды. Краску наносят на подогретые до 90 – 150 °С поверхности при помощи распылителя или кистью.

Футеровку индукционных тигельных печей для алюминиевых сплавов рекомендуется выполнять набивкой из жаростойких бетонов. Хорошо зарекомендовали себя бетоны на жидком стекле с кремнефтористым натрием. Они имеют следующий состав, % мас.: 28,8 – тонкомолотый магнезит; 25,0 – шамотная крошка размером 0,15 – 0,50 мм; 30,0 – шамотная крошка размером 5 – 10 мм; 15 – жидкое стекло с плотностью 1,36 – 1,38 и 1,2 – кремнефтористый натрий. Высокую прочность жаропрочный бетон приобретает после обжига при температуре выше 800 °С.

Индукционные тигельные печи промышленной частоты, несмотря на их значительно широкое использование, имеют целый ряд недостатков:

- значительный расход электроэнергии;
- низкая стойкость футеровки;
- взрывоопасность печей, возникающая при неисправности системы водоохлаждения индуктора;

низкое качество выплавляемых алюминиевых сплавов с повышенным содержанием газа и неметаллических включений.

Индукционные каналные печи являются одними из наиболее совершенных плавильных агрегатов, но и они имеют недостатки:

- быстрое зарастание каналов;
- необходимость их периодической чистки;
- довольно частые футеровки и перефутеровки;
- вынужденное ограничение мощности с целью уменьшения зарастания

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

каналов;

– образование довольно частого пинч-эффекта – разрывов металла в каналах.

Примером новой технологии, обеспечивающей качественное изготовление деталей из алюминиевых сплавов, явилось использование дуговых печей постоянного тока нового поколения (ДППТНП), разработанных специалистами научно-технической фирмы «ЭКТА» [1].

Впервые в мире данное новейшее плавильное оборудование используется как для плавки чугуна, стали, алюминиевых, так и различных других сплавов. Развитие новой плавильной техники и технологии плавки алюминиевых сплавов способствует как ускорению научно-технического прогресса в целом, так и повышению эффективности отдельных производств, за счет роста производительности труда, улучшения качества выпускаемой продукции.

Плавка алюминиевых сплавов дугой постоянного тока с высокой концентрацией вводимой в печь энергии представляет собой принципиально новое направление, обеспечивающее решение практически всех проблем, существующих при использовании известных типов печей. Так, например, использование ДППТНП для плавки алюминиевых сплавов позволило решить одну из важнейших мировых задач, связанную с экономией первичного алюминия, во-первых, за счет сокращения угара металла в 2,5–3 раза по сравнению с другими наиболее широко используемыми печами, во-вторых, за счет возможности использования ДППТНП для выплавки сплавов из вторичного сырья, не уступающим по качеству сплавам, приготавливаемым из первичных металлов.

Следующим важнейшим преимуществом ДППТНП по сравнению с другими типами электрических печей является более низкий расход электроэнергии. Так, по сравнению с индукционными печами, расход электроэнергии ниже на 20 %, соответственно с электропечами сопротивления – расход электроэнергии еще ниже. В среднем расход электроэнергии в ДППТНП составляет 340 кВт·ч/т.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

3. ВНЕПЕЧНАЯ ОБРАБОТКА (РАФИНИРОВАНИЕ, МОДИФИЦИРОВАНИЕ)

3.1 Рафинирование

Значительная часть водорода в алюминиевых расплавах связана в комплексы с оксидом алюминия $xH \cdot yAl_2O_3$ [9.16]. Поэтому удаление водорода влечет за собой уменьшение в расплаве Al_2O_3 и наоборот.

Для получения алюминия высокой чистоты в промышленности принят метод трехслойного рафинирования. В электролизере имеется три слоя: нижний слой – анодный сплав плотностью $3,2-3,5 \text{ г/см}^3$ состоящий из первичного алюминия с 30–40% меди; над ними слой электролита, состоящий из смеси фторидов алюминия и натрия (отвечающего по составу хиолиту) и утяжелителя – хлорида бария и хлорида натрия плотностью около $2,7 \text{ г/см}^3$; на поверхности электролита находится слой чистого алюминия плотностью $2,3 \text{ г/см}^3$ – катод.

Процесс ведут при температуре электролита $760-810 \text{ }^\circ\text{C}$. На аноде происходит растворение алюминия и примесей более электроотрицательных, чем алюминий – натрия кальция и др. Основные примеси, содержащиеся в первичном алюминии – железо, кремний, как и медь, являются более электроположительными, чем алюминий и накапливаются в анодном сплаве. На катоде катионы алюминия восстанавливаются, а примеси натрия и других электроотрицательных металлов остаются в виде ионов в электролите. Слой анодного сплава сообщается с карманом в боковой футеровке. Через этот карман идет питание анодного сплава техническим алюминием.

По мере накопления примесей в анодном сплаве происходит их диффузия в карман, где температура на $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже, чем в аноде. Примеси железа и кремния образуют с алюминием и медью ряд интерметаллидов, которые при охлаждении в кармане выпадают в виде твердых осадков, и время от времени их из кармана извлекают. Таким образом, содержание примесей в анодном сплаве

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

поддерживается на определенном уровне и обеспечивается непрерывность процесса.

В промышленных условиях используется целый ряд методов рафинирования и дегазации расплавов, причем выбор того или иного способа обычно основан не на наибольшей его эффективности, а на технических, технологических и материальных условиях литейного цеха. От качества проведения операции рафинирования во многом зависит и качество получаемого сплава. В общем случае, используемые методы рафинирования делятся на адсорбционные и неадсорбционные. Первые нарушают равновесие в системе расплав – комплекс ($xH \cdot Al_2O_3$) только в тех зонах расплава, через которые проходит абсорбент, а вторые – во всем объеме [7].

К адсорбционным методам относится обработка расплава газами (аргоном, азотом, хлором и др.), хлористыми солями ($MnCl_2$, $ZnCl_2$, C_2Cl_6 и др.) [16.17], обработка расплава геттерами водорода (титаном, цирконием), флюсовое рафинирование, фильтрация через активные (переплавленные эвтектические смеси хлористых солей магния, натрия, кальция и др.) и инертные (стеклоткань, металлические сетки и др.) фильтры. К неадсорбционным методам рафинирования относятся отстаивание, обработка расплавов ультразвуком, вакуумирование, дегазация постоянным электрическим током, вращающимся магнитным полем, виброимпульсная дегазация расплава и др. .

Наиболее простым способом рафинирования является отстаивание расплава. В процессе отстаивания легкие частицы примесей всплывают на поверхность расплава, а тяжелые – оседают на дно печи. Одновременно с этим происходит также и выделение части растворенного в металле газа (в основном водорода), пузырьки которого образуются преимущественно на взвешенных в расплаве частицах примесей и вместе с ними всплывают на поверхность металла [14, 16].

В обычном расплаве алюминия содержится от 0,008 до 0,03% взвеси оксидов алюминия, большая часть которой имеет размеры частиц менее 1 мкм

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

[18]. Если допустить, что включения имеют шарообразную форму и их осаждение или всплывание подчиняется закону Стокса, можно оценить эффективное время отстаивания. По данным источников эффективное время отстаивания резко возрастает с уменьшением размера частицы. Так, если при размерах частиц 0,1 мм продолжительность седиментации составляет 2,8 мин, то при размерах частиц 0,01 мм оно возрастает до 218 мин. Существенными недостатками этого метода является его малая эффективность, высокая длительность и связанная с этим потеря производительности плавильно-литейного оборудования. Чтобы увеличить чистоту расплава алюминия в 2 раза необходимо вести отстаивание в течение 10 часов. Кроме того, следует учитывать, что степень очистки расплава, достигаемая при отстаивании, зависит от влажности атмосферы печи, которая, в свою очередь, определяется влажностью цеховой атмосферы, зависящей от климата и времени года, эффективности покровных флюсов и пр.

В расплаве алюминия термодинамически возможна агрегация дисперсных неметаллических частиц за счет их взаимной адгезии [19.20]. В связи с тем, что включения Al_2O_3 не смачиваются при обычных температурах (до 800 °С) алюминием [7], работа адгезии становится величиной положительной.

Наиболее приемлемыми и эффективными методами рафинирования и дегазации алюминиевых сплавов в промышленных условиях, как показывает практика, являются [13.14]: продувка расплава газами; очистка расплава фильтрацией; вакуумирование жидкого металла; обработка расплава специальными солевыми композициями (флюсами, таблетированными препаратами и т.п.).

3.1.1 Очистка алюминиевых сплавов продувкой газами

Очистка расплавов при продувке инертными по отношению к алюминию газами осуществляется при реализации двух процессов:

– удаление водорода, диффундировавшего в пузырек инертного газа;

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

– удаление включений за счет флотирующего воздействия на них пузырьков газа.

Очистка осуществляется тем успешнее, чем меньше размер пузырьков продуваемого газа и равномернее их распределение в объеме жидкого металла.

Процесс удаления водорода из расплава за счет проникновения атомов водорода в газовый пузырек состоит из нескольких стадий:

- 1) перемещение атомов водорода в жидком металле к границе раздела металл–газ;
- 2) переход атомов водорода через границу раздела;
- 3) образование молекул водорода вблизи границы раздела;
- 4) переход молекул водорода в газовую фазу.

В дальнейшем газовый пузырек выходит из расплава вместе с растворенным в нем водородом.

Эффективность дегазации повышается при увеличении поверхности контакта. В связи с этим продувка алюминиевых сплавов рафинирующим газом через трубки большого диаметра (10–20 мм), позволяющие получать крупные пузырьки диаметром ~15 мм, не является достаточно эффективной. Кроме того, при продувке расплава пузырями большого размера происходит значительное нарушение сплошности защитной оксидной пленки на зеркале расплава, что приводит к увеличению окисления металла и насыщению его водородом.

При интенсивном барботаже обрывки окисной пленки могут замешиваться в расплав и попадать в тело отливки. В связи с этим, в последние годы для продувки широко используются пористые керамические вставки. В этом случае размер пузырьков газа уменьшается до ~3 мм, что позволяет существенно увеличить поверхность контакта металл–газ и тем самым повысить эффективность дегазации.

Недостатком данного способа обработки является ограниченная возможность интенсификации процесса за счет повышения избыточного давления рафинирующего газа ($P_{изб} = 0,07–0,15$ атм). Это связано с тем, что «живое»

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

сечение пор, участвующих в процессе возрастает одновременно с ростом давления рафинирующего газа [7].

При этом из-за низкой смачиваемости материала пробки расплавом в среде рафинирующего газа, возрастает вероятность образования газовой «подушки», перекрывающей несколько соседних отверстий. Размер образующихся при этом пузырей достигает 9 мм [16]. Рост размеров пузырьков, в свою очередь, резко снижает эффективность рафинирования.

Эффективность рафинирования также зависит от времени продувки, отношения объемов металла и газа к поверхности раздела газ–металл, химико-физической природы поверхности раздела [20.21].

Из последних достижений в данной области заслуживают внимания работы, выполненные в Московском институте стали и сплавов, по продувке расплава высокоскоростной газовой струей [15.22]. Данный способ высокоэффективен, но требует применения специального оборудования и обязательной сушки вдуваемого газа

В результате такого рафинирования происходит захлаживание расплава, что может привести к ухудшению жидкотекучести и формозаполняемости. В качестве инертного газа для данного метода используют азот или аргон высокой чистоты.

Для более интенсивного удаления водорода в настоящее время используют обработку высокотемпературными аргоновыми струями. При плазменной обработке увеличивается межфазная поверхность в зоне внедрения плазменной струи (с $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ до $8,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$); повышается температура расплава в зоне обработки, что влечет за собой рост атомарного и эффективного коэффициентов диффузии водорода в алюминии (увеличиваются соответственно в 2,6 и 1,7 раза).

Также при нагреве свыше 830°C разрушается оксидная пленка на поверхности раздела фаз, которая препятствует переходу атомов водорода в пузырьки рафинирующего газа и замедляет дегазацию.

Понятно, что указанный метод очистки металла требует наличия

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

дорогостоящего оборудования. Наиболее эффективной является плазменная обработка расплавов фтористым алюминием.

Однако необходимо отметить, что использование хлора, фтора и их соединений для рафинирования сплавов на основе алюминия сопровождается выделением веществ опасных для здоровья работающего персонала и состояния окружающей среды, что влечет за собой необходимость решения проблемы нейтрализации вредных выбросов.

Формирование рафинирующей газовой фазы в объеме расплава возможно в результате введения инертного газа через специальные трубки, сопла, фурмы, пробки, диафрагмы и т. Д.[22].

В ряде представленных в настоящее время на рынке установок реализован принцип, при котором подача рафинирующего газа производится через щелевидные отверстия, выполненные в графитовом роторе[22.23], вращающемся с частотой 200–250 об/мин.

Вращение насадки приводит к уменьшению размера газовых пузырей и пронизыванию ими всего объема расплава.

На рисунке 3.1 приведена принципиальная схема подобного устройства модели «ALPURS 1000» фирмы «Pechiney».

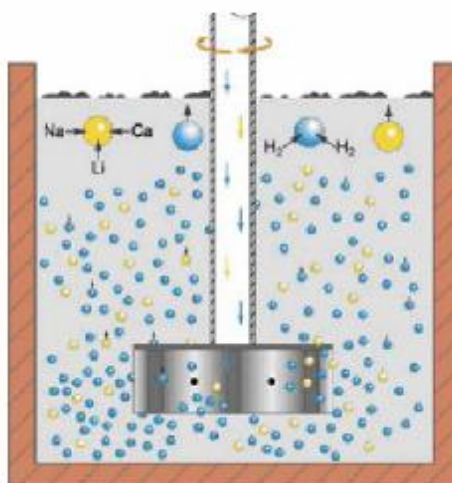


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема установки для продувки алюминиевых расплавов «ALPURS 1000»

Вращающийся ротор впрыскивает в расплав поток пузырьков, и когда распыленные пузырьки проходят через металл, происходит насыщение их водородом. Степень дегазации от водорода составляет 50–60%, при концентрации водорода на входе $0,3 \text{ см}^3 / 100\text{г}$. Производительность предлагаемых установок до 60 т/ч, расход рафинирующего газа $0,3–0,5 \text{ м}^3 / \text{т}$.

Предложенное фирмой «Pechiney» устройство позволяет проводить обработку инертным газом алюминиевых сплавов не только в заливочных ковшах, но и в раздаточных печах, причем выполнять это по мере необходимости. Существенным недостатком применения аналогичных установок в условиях отечественного производства является их высокая стоимость и, что более важно, высокая стоимость их дальнейшего обслуживания.

Кроме того, образующийся в процессе продувки шлак содержит достаточно большое количество алюминия.

Использование продувки расплава совместно с флюсовой обработкой позволяет снизить содержание алюминия в скачиваемом шлаке и повысить эффективность очистки металла за счет минимизации протекания процессов повторного насыщения расплава водородом, неметаллическими включениями и т.п.

Для продувки алюминиевых расплавов применяют нейтральные (аргон, азот) и активные (хлор, фреон) рафинирующие газы. Рафинирование алюминиевых расплавов нейтральными газами постепенно вытеснило хлорирование из практики производства сплавов.

Отказ от применения хлора при рафинировании алюминиевых расплавов в немалой степени способствовали повышению требований по защите окружающей среды и необходимостью улучшения условий труда в литейных цехах [16].

Из нейтральных газов чаще других используют азот и аргон (99,99%). Продувку нейтральными газами ведут при $720...730 \text{ }^\circ\text{C}$ вводя газ непосредственно в печь, через пористую керамику находящуюся в футеровке пода печи. Расход газов составляет $0,1...0,6 \text{ м}^3$ на 1 тонну расплава.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

Длительность продувки составляет 5...7 мин в зависимости от массы сплава. Время отстоя расплава 8...10 мин.

Перемещение пузырька рафинирующего газа в расплаве сопровождается насыщением его водородом вследствие диффузии, обусловленной разницей в концентрациях водорода в жидком металле и продуваемом газе.

Процесс удаления водорода, растворенного в ванне, при продувке расплава рафинирующим газом состоит из ряда последующих стадий:

- перемещение атомов водорода в жидком металле к границе раздела металл газовые пузырьки.
- перехода атомов водорода через границу раздела.
- рекомбинации атомов водорода вблизи поверхности раздела.

Увеличению поверхности контакта расплава с рафинирующим газом способствует уменьшение размера отверстий – пористых керамических диафрагм с порами размером 60–80 мкм. Газ пропускается снизу через всю толщину расплава, при этом в пузырьки газа диффундирует растворенный в расплаве водород.

Всплывающие пузырьки встречают на пути взвешенные неметаллические включения и выносят их на поверхность. Чем меньше диаметр пузырьков нейтрального газа, тем дольше их контакт с обрабатываемым металлом.

Для получения мелкодисперсных пузырьков разработан способ введения нейтрального газа в расплав через пористый керамический диск, расположенный в нижней части печи. Это позволяет обеспечить конечное содержание водорода в расплаве не более 0,2 см³ на 100 г металла.

Исследовав методы рафинирования алюминиевых сплавов обозначим положительные и отрицательные стороны каждого метода:

- рафинирование с использованием хлор и фторосодержащих флюсов предусматривает установку оборудования для приготовления флюса, необходимость затрат времени и энергии на выполнение технологического процесса, ухудшает экологическую ситуацию.

- электровакуумное рафинирование позволяет эффективно отчистить расплав от газов, но конструкция установки требует материальных вложений с необходимостью постоянного обслуживания.

Применение электрода повышает уровень энергозатрат. Период вакуумирования составляет 15...20 минут.

- рафинирование продувкой нейтральными газами непосредственно в печи через пористую керамику находящуюся на дне, наиболее выгодный метод для сплава АК7ч. Длительность продувки 5...7 минут и газосодержание в расплаве после продувки, делают этот метод наиболее привлекательным.

- Кроме того, обработка в печи позволяет поддерживать температуру, при этом не вводятся металлические и оксидные включения в расплав.

3.2 . Методы рафинирования алюминиевых сплавов представлены на рисунке

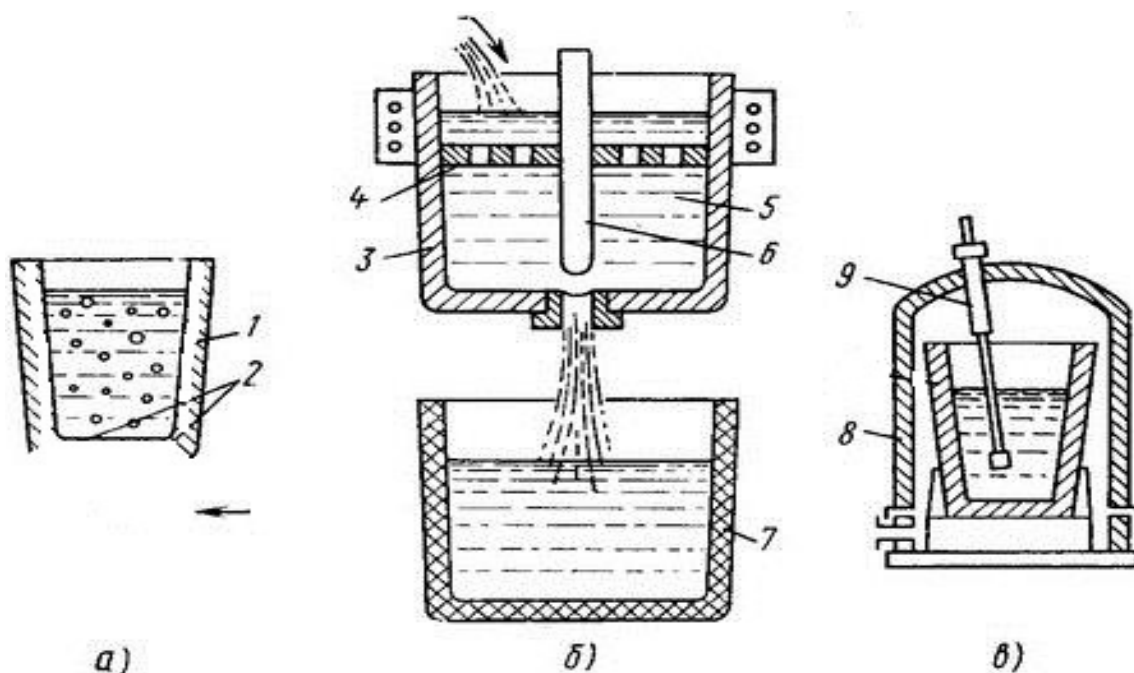


Рисунок 3.2 – Методы рафинирования алюминиевых сплавов

а) – продувка газами в печи, б) – фильтрование через слой расплавленного флюса, в) – вакуумирование с последующей продувкой газами.

1 – индуктор, 2 – пористая керамика, 3 – тигель, 4 – диск, 5 – флюс, 6 – запорный стержень, 7 – раздаточный ковш, 8 – вакуумно-продувочная камера, 9 – трубка для продувки газами

3.1.2. Очистка расплава фильтрованием

В больших масштабах для очистки алюминиевых расплавов от неметаллических включений применяют фильтрование через сетчатые, зернистые, пористые, керамические фильтры [14].

При осуществлении фильтрации загрязненный включениями расплав пропускается через фильтры, материалом которых может быть стеклоткань, пористые пластики, гранулы, кусковые активные вещества, жидкий флюс и т.д. В основе этого метода лежит физическая адсорбция и хемосорбция расплава на границе раздела расплав – фильтр, а также механическое торможение и улавливание находящихся в жидком металле взвешенных частиц посторонних примесей.

В случае применения нейтральных фильтров (металлические сетки, стеклоткань и т.д.) неметаллические включения задерживаются механическим способом. Более высокого эффекта при фильтрации можно достигнуть, если использовать, так называемое, адгезионное рафинирование [14]. Суть адгезионного рафинирования состоит в том, что при течении металла по каналам фильтра создаются хорошие условия для осуществления контакта включений с поверхностью фильтра, то есть создаются условия, при которых включение притягивается к фильтру и удерживается на его поверхности. Эффективность процесса очистки определяется величиной работы адгезии включений к фильтру в среде металла [14].

Ввиду плохого контакта взаимодействующих фаз (фильтр–включение) в среде газа величина работы адгезии включений к фильтру в среде газа весьма мала и не превышает 1% работы адгезии включений к фильтру в среде металла. В связи с этим становится ясно, что эффективность очистки алюминиевых сплавов от включений возрастает по мере ухудшения смачивания расплавом как материала фильтра, так и включений.

В этом случае работа адгезии включений к фильтру в среде металла

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

становится величиной положительной. Это означает, что расплав выталкивает из своей среды несмачиваемые им включения, а они задерживаются на такой поверхности, которая в свою очередь не смачивается металлом (то есть расплав не должен смачивать фильтр).

Установлено, что величина работы адгезии включений к фильтру в среде металла имеет большое значение при использовании для очистки алюминиевых сплавов от Al_2O_3 фильтров из магнезита, графита, корунда, сплава фторидов (например, кальция и магния). Эффективность очистки возрастает с увеличением толщины фильтра, уменьшением размеров зерен и снижением скорости течения металла в зоне фильтра.

Максимальный эффект очистки по данным ряда исследователей [14.16] достигается при использовании фильтров из материалов, весьма активных к включениям (фторидов). Применение тонкой фильтрации через керамические фильтры или многослойные сетчатые фильтры с числом слоев от 5 до 10, задерживающие включения размером более 10–20 мкм, позволяет снизить количество оксида алюминия на 10–30%, положительно оценивается эффективность очистки расплавов от крупных включений и в небольшой мере от водорода.

Высокие результаты рафинирования обеспечивают различные методы комбинированной очистки алюминиевых сплавов. Одним из таких методов является процесс "Alcoa–469". Он заключается в фильтровании расплава через фильтры грубой и тонкой очистки с одновременной продувкой аргоном с небольшими добавками хлора.

Хлор вводят из расчета от 1 до 10 частей (объемных) на 100 частей аргона, чтобы в процессе обработки он полностью вступал во взаимодействие с расплавом. В этом случае снижается вредное влияние хлора на обслуживающий персонал и оборудование.

Еще один способ комбинированной очистки алюминиевых расплавов. Емкостью для рафинирования служит футерованный ковш, в дне которого

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

находятся газопроницаемые элементы. Над ними расположен фильтр из нефтяного кокса.

В процессе работы расплав продувается и одновременно фильтруется через нефтяной кокс. В крышку рафинирующей емкости вмонтированы нагревательные элементы. На выходе расплав защищается от окисления аргоном, поступающим из трубки с мелкими отверстиями.

Необходимо отметить, что использование тонкой фильтрации при изготовлении фасонных отливок в массовом производстве весьма затруднительно, что связано, в первую очередь, с захлаживанием металла при прохождении через фильтр, созданием дополнительного гидравлического сопротивления и экономической стороной вопроса.

Использование сетчатых фильтров является более дешевым и не вызывает заметного падения температуры расплава, однако эффективность рафинирования в этом случае зависит от размера ячейки сетки, которую можно уменьшать только до определенного предела. Так, например, расплав алюминия не может пройти через сетку с размером ячейки 0,5x0,5 мм без дополнительного давления, поэтому для очистки алюминиевых сплавов применяются сетки с размерами ячеек 0,6x0,6 мм и крупнее [15]. Тонкодисперсные включения, размер которых значительно меньше размеров ячейки сетки, не могут механически задерживаться фильтрами и проходят через них.

Возможности отделения тонкодисперсных включений в результате адгезионного взаимодействия ничтожно малы ввиду малой поверхности контакта расплава с фильтром. Поэтому при использовании сетчатых фильтров не может, вероятно, идти речь о так называемой тонкой фильтрации. Исключение составляют сетчатые фильтры на основе кремнезема, пропитанные адсорбентами, как правило, фторидами (Na_3AlF_6 и др.).

Для получения максимальной эффективности при использовании таких фильтров согласно рекомендациям производителя ООО «ПромФильтр» их рекомендуется устанавливать пакетами по пять–десять сеток подряд в

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

зависимости от требуемой степени чистоты получаемых изделий по неметаллическим включениям и газам.

Обычно фильтры используются однократно, так как их трудно очистить от алюминиевого сплава после окончания заливки формы. В связи с этим фильтрование находит большее применение при непрерывной разливке сплавов, то есть когда через фильтр одновременно проходит большой объем расплава.

3.1.3. Вакуумирование жидкого металла

Наиболее широкое распространение в производстве алюминиевых сплавов получило выстаивание расплавов в вакууме. Применение данного метода рафинирования для дегазации алюминиевых сплавов оправдано и дает гарантированное снижение содержания водорода в расплаве [7,16]. Степень дегазации в случае применения данного метода достигает 70%.

В промышленных условиях вакуумирование проводят в оборудованных миксерах вместимостью от 6 до 20 тонн при остаточном давлении 67–107 Па. Отличительной особенностью вакуумных миксеров является наличие мощной футеровки, позволяющей обеспечивать снижение температуры расплава со скоростью не более 0,5 °С/мин и нагревательных элементов.

Вакуумным миксерам также присуща незначительная глубина ванны (не более 0,8 м) необходимая для обеспечения высокой эффективности процесса и сокращения времени обработки. Уменьшение глубины ванны существенно ускоряет дегазацию. Это связано особенностями развития пузырькового газовыделения.

Установлено, что при создании разряжения над поверхностью расплава пузырьковое выделение происходит в поверхностных слоях ванны металла, где значения критического радиуса зародыша газовой фазы наименьшие. При высокой концентрации газа дегазация определяется двумя соизмеримыми скоростями.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

Во-первых, скоростью перехода водорода через поверхность раздела фаз, тесно связанной с частотой актов коагуляции в пузырьки отдельных газовых скоплений на частицах оксида.

Во-вторых, скоростью массопереноса, которая из-за малого расстояния между отдельными частицами и большой концентрацией водорода высока и не лимитирует скорость дегазации. С уменьшением содержания водорода в поверхностном слое образование и рост газовой фазы замедляются, и процесс зависит только от массопереноса водорода.

Дегазация остальных слоев ванны протекает в диффузионном режиме и осуществляется за счет конвективной диффузии, так как образование фаз молекулярного водорода в них термодинамически невозможно.

Пузырьковое газовыделение при выдержке алюминиевого расплава в разряженной атмосфере начинается при остаточном давлении ~24 кПа и за 10–15 секунд распространяется на глубину 1,5–2 см от поверхности расплава [13]. Повышение температуры металла при вакуумировании приводит к росту скорости газовыделения

Следует отметить, что наряду с высокой степенью дегазаций расплава при применении данного метода обработки на практике отмечается лишь незначительное снижение загрязненности металла неметаллическими включениями.

Во избежание газопоглощения расплава после проведения обработки разливку производят как можно быстрее с уровня металла 60–80 мм над подиной по трубопроводу под действием избыточного давления.

Кроме того, эксплуатация вакуумных миксеров в условиях промышленного производства довольно затруднительна и целесообразность ее должна быть предварительно оценена. Несмотря на высокую эффективность, по экономическим и технологическим соображениям, рафинирование расплава вакуумированием используется в основном в производстве отливок для авиакосмических нужд.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

3.1.4. Рафинирование расплава солевыми композициями.

Наиболее технологичным и эффективным методом рафинирования алюминиевых сплавов в литейных цехах, изготавливающих фасонные изделия, как показывает практика, является обработка расплава специальными солевыми композициями – флюсами [7, 11]

В настоящее время для защиты алюминиевых сплавов от окисления, поглощения газов, а также удаления неметаллических включений широкое распространение получила обработка расплавов флюсами, состоящими из хлоридов и фторидов щелочных и щелочноземельных металлов.

Рафинирующее действие флюсов заключается в том, что они способны адсорбировать до 10% (по массе) оксида алюминия и растворять его до 1%, при этом удаляется и водород, образующий комплексы с Al_2O_3 .

Чаще всего применяют флюсы на основе хлоридов натрия и калия ($NaCl-KCl$), эквимольная смесь которых имеет невысокую температуру плавления (650–660 °С). Добавки других соединений способны существенно изменять температуру плавления смеси, зачастую, в сторону увеличения.

Как покровный флюс, смесь хлоридов натрия и калия (1:1) чаще всего использовалась без добавок фторидов, однако в последнее время стали применяться покровные флюсы с содержанием до 5,0% фторида натрия, фторида калия, калиевого криолита и фтористого алюминия.

Для рафинирования большинства алюминиевых сплавов чаще всего используют флюсы с криолитом Na_3AlF_6 , содержание которого варьируется в широких пределах.

В последние годы разработана целая гамма рафинирующих флюсов для алюминиевых сплавов с добавками таких соединений, как кремнефтористый натрий и калий (Na_2SiF_6 , K_2SiF_6), фтористый литий LiF , фтористый алюминий AlF_3 , хлористый литий $LiCl$ и другие [13,14].

Особую группу составляют универсальные флюсы, обработка которыми

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

позволяет совместить ряд операций (защиту, рафинирование, модифицирование). Модифицирующее действие является результатом перехода в расплав таких элементов, как натрий, стронций, титан, бор и др.

Это, например, универсальный флюс на основе хлоридов натрия и калия с 30% NaF и 10% Na₃AlF₆ или флюс этой же системы с 5–10% SrF₂, для защиты расплава, рафинирования и диспергирования включений эвтектического кремния, а также хлоридные флюсы с K₂TiF₆ и KBF₄, которые, кроме покровной и рафинирующей функции, измельчают макрозерно твердого раствора на основе алюминия [13.14.24].

Флюсы для рафинирования алюминиевых сплавов должны обладать рядом свойств, которые определяют их эффективность:

– температура плавления флюса должна быть ниже температуры сплава в период разливки, то есть флюс должен быть жидким;

– плотность жидких флюсов и шлаков на их основе должна быть меньше плотности жидкого сплава для всплытия их на поверхность металла в ковше или печи;

– вязкость флюсовых систем должна быть невелика, и мало отличаться от вязкости расплава (при 700°C значения динамического коэффициента вязкости флюсов находятся в пределах 1–2 мНс/м², а чистого алюминия – 1,5 мНс/м²);

– флюсы должны хорошо смачивать неметаллические включения или растворять их;

– гигроскопичность флюсов должна быть как можно меньше для предотвращения возможного загрязнения сплава водородом;

– флюсы должны легко удаляться с поверхности расплава.

Общим недостатком использования рафинирующих флюсов на основе хлоридов и фторидов, является токсичность выделяющихся при обработке расплавов веществ. Для улучшения экологических показателей флюсовой обработки расплавов ведется поиск составов с повышенной экологической чистотой. В данном случае в них стараются уменьшить содержание хлоридов и

фторидов.

Однако, использование низкотоксичных флюсов не всегда обеспечивает требуемую степень очистки и высокие механические свойства получаемых отливок. Такие составы, как правило, интенсифицируют зарастание стенок плавильных агрегатов и ковшей, а образующийся при обработке шлак содержит большое количество алюминия.

Механизм очистки от включений основан на извлечении их из расплава за счет адсорбции, растворения или химического взаимодействия с солевыми флюсами. Сам процесс рафинирования протекает в несколько стадий [14]:

- доставка включений потоком металла в зону контакта металл–флюс;
- переход включений из потока металла на поверхность раздела металл–флюс;
- агрегация (ассимиляция) флюсом включений.

Работа флюса начинается уже при плавке твердой шихты, перемешанной с порошкообразным флюсом, который расплавляется раньше, чем металл и осуществляет предохранение металла от повышенного окисления и частичную очистку от окисных плен.

Неметаллические включения и окисные пленки переходят во флюс, если они хорошо им смачиваются. Величины поверхностного натяжения расплавленного флюса на границах с твердой фазой (включения–окислы) и с жидкой фазой (расплав), мерилем которых служат краевые углы смачивания (рисунок 3.3), определяют адсорбирующие способности флюса [14].

Таким образом, термодинамика взаимодействия флюса с включениями в расплаве определяется соотношением межфазных натяжений на границах раздела, а кинетика процесса – степенью контакта флюс–включение. Чем меньше поверхностное натяжение флюса на границе с окисью, тем легче флюс ее смачивает (обволакивает) и отделяет от расплава. В свою очередь, чем больше поверхностное натяжение на границе флюса с металлом, тем легче он может отделяться от жидкого металла.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

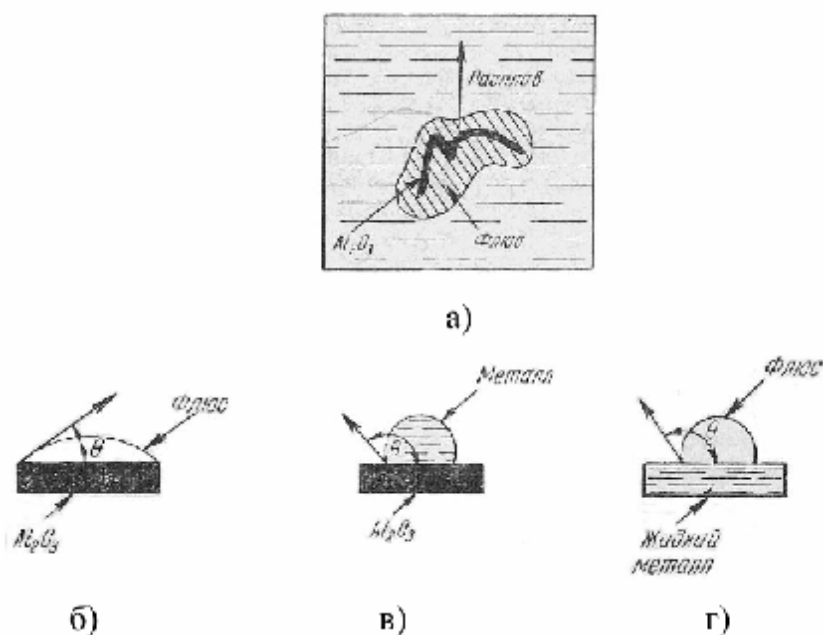


Рисунок 3.3 – Схема офлюсования неметаллических включений в расплаве
 а): б) – условия смачивания включения флюсом; в) – условия несмачивания окисла металлом; г) – условия ограниченного смачивания флюса металлом

Таким образом, при рафинировании флюс обволакивает неметаллические включения и поднимается вместе с ними на поверхность. Частицы тем интенсивнее переходят во флюс, чем лучше они им смачиваются. Краевой угол смачивания включения Al_2O_3 флюсами системы $NaCl-KCl-NaF-Na_3AlF_6$ составляет 20–400 в зависимости от состава и температуры. Время растекания капли флюса по частице Al_2O_3 из-за низкой вязкости флюса составляет 10–20 секунд

Как уже отмечалось, эффективность очистки алюминиевых сплавов флюсами зависит не только от свойств флюса, но и от условий доставки включений на границу раздела металл–флюс. Ниже приведены основные способы доставки включений в зону взаимодействия:

- а) свободными конвективными потоками металла без принудительного перемешивания;
- б) принудительно циркулирующими потоками;
- в) принудительным перемешиванием флюса в металле с диспергированием

его в капли;

г) прохождением струи металла через слой жидкого флюса.

На практике рафинирование флюсами чаще всего проводят замешиванием расплавленного флюса в металл, что сопровождается принудительным его диспергированием и увеличением поверхности контакта металл–флюс. Перемешивание ведут в течение нескольких минут, а затем выдерживают расплав для всплывания продуктов взаимодействия, капель флюса, шлака. Включения, особенно небольшого размера, благодаря вязкости металла связаны с его потоком.

Для перехода на границу раздела металл–флюс они должны под действием каких-либо локальных сил преодолеть заторможенный ламинарный слой потока металла, примыкающий к поверхности флюса. Выход включений из несущего потока металла возможен по инерционному, диффузионному и турбулентному механизмам.

По инерционному механизму вынос включений из потока осуществляется благодаря силам инерционного движения частиц при изменении вектора скорости течения металла (главным образом при изменении направления течения) и эффективен только для включений размером более 100 мкм. Диффузионный механизм выхода включений из потока вследствие броуновской диффузии частиц возможен только при размере их менее 10^{-3} мкм, и очевидно, практического значения не имеет.

Наиболее эффективен турбулентный механизм. По этому механизму движение включений в направлении, перпендикулярном потоку, происходит благодаря турбулентной пульсации струи.

Одним из самых эффективных способов очистки алюминиевых расплавов от плен и включений является электрофлюсовое рафинирование. В этом случае в слое жидкого флюса толщиной 100–150 мм создается поле постоянного электрического тока напряжением 6–12 В и силой 600–800 А. Пропускание тонких струй расплава через слой жидкого флюса с одновременным наложением поля создает благоприятные условия для адсорбции включений флюсом за счет

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

снижения межфазного натяжения на границе флюс–металл и уменьшения краевого угла смачивания флюсом включений.

В свое время широкое распространение получил способ очистки металла путем введения в алюминиевые сплавы хлоридов ($MnCl_2$, $ZnCl_2$) [13], которые при взаимодействии с алюминием (или разложении) выделяют газообразные продукты взаимодействия, оказывающие на расплав рафинирующее действие. Впоследствии рафинирование хлоридами уступило место использованию специальных препаратов для обработки алюминиевых сплавов, типа «Дегазер» состоящего из 90% гексахлорэтана (C_2Cl_6) и 10% хлористого бария ($BaCl_2$).

Основной компонент препарата – гексахлорэтан – вещество белого цвета с плотностью $2,091 \text{ г/см}^3$ и температурой возгонки $185,5^\circ\text{C}$ взаимодействует с алюминием с образованием газообразных продуктов – хлористого алюминия ($AlCl_3$) и тетрахлорэтилена (C_2Cl_4). Ввод в расплав указанных материалов осуществляют при помощи погружного колокольчика. В целом следует отметить, что эффективность применения препарата «Дегазер» весьма высока и практически не отличается от эффективности продувки инертными газами [18]. Однако при использовании хлоридов и препарата «Дегазер» происходит загрязнение атмосферы литейного цеха высокотоксичными хлоридами, что ухудшает экологическую обстановку и требует специального оборудования для их улавливания и нейтрализации.

По этой причине является нежелательным, а в ряде стран, в том числе в Российской Федерации и Республике Беларусь, запрещенным применение препарата "Дегазер" и гексахлорэтана, которые до сих пор используются для обработки на некоторых предприятиях.

В настоящее время разработана широкая гамма солевых таблетированных материалов для объемной обработки расплавов на основе алюминия. Следует отметить высокоэффективные препараты на основе серы – ТПФ–2 и Таблетка дегазирующая для доэвтектических и эвтектических силуминов технического алюминия производства ООО «ПромФильтр» и ОДО «Эветектика», Республика

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

Беларусь, а также экологически безвредные препараты на основе азотосодержащих соединений DegazaT200 и ТПФ–1 производства фирмы «Schäfer», Германия, и ООО «ПромФильтр», Республика Беларусь.

Содержащиеся в алюминиевых расплавах переходные металлы (цирконий, титан) являются геттерами (поглотителями) по отношению к водороду и могут действовать дегазирующе. Преимущественной упреждающей реакцией появления пузырьков является образование гидридов металла.

Например, при обработке расплава фторцирконатом калия или фтортитанатом калия цирконий и титан восстанавливаются из солей, переходя в расплав, измельчают зерно, а также связывают водород в гидриды, не давая ему возможность образовывать поры. Образующиеся в результате распада солей пузырьки фтористого алюминия AlF_3 всплывают и действуют подобно пузырькам других газов.

3.1.5 Рафинирование металлом–геттером

Эффективность дегазации металлом–геттером была оценена на сплаве АК7Ч. Качество сплава оценивали по вакуумным пробам, макро-, микроанализам шлифов, химического анализа, по результатам испытаний образцов на газосодержание и механические свойства.

Зависимость газосодержания в сплаве и механических свойств от времени обработки металлом–геттером определилась при расходе последнего 0,2% от массы расплава. По средним значениям газосодержания и механических свойств построены кривые зависимости от времени обработки. Как видно, обработку расплава металлом–геттером эффективно проводить в течение 6...7 минут.

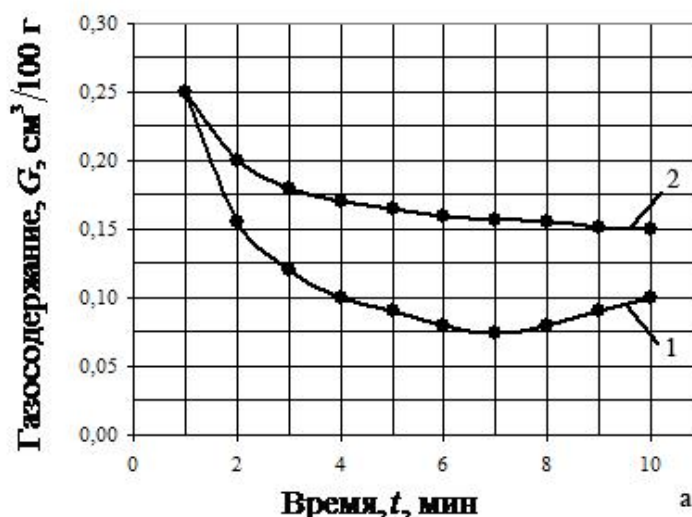
Металл плавился в печи сопротивления модели САТ–0,15 вместимостью тигля 150 кг. После расплавления металла и достижения 740 °С вводили фторцирконат калия (0,2 мас. %) с помощью колокольчика, изготовленного из титанового прутка в виде спирали (шаг витка 4...5 мм) с коническим

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

хвостовиком, переходящим в ручку.

При погружении колокольчика в расплав контакт фторцирконата калия с жидким металлом осуществляется по всей высоте колокольчика и его периметру, что обеспечивало более полное рафинирование расплава в отличие от обычного колокольчика. Титановую стружку марки ВТ-16 толщиной 0,10...0,15 мм и шириной 3...6мм (0,2 мас %) помещали в специальный контейнер, сваренный из титановых прутков, и подогревали до 200...250 °С.

Контейнер предварительно очищали и окрашивали кокильной краской, после чего погружали в расплав при 740 °С. По мере роста времени обработки металлом-геттером, газосодержание расплава резко снижается и повышается относительное удлинение, максимум наблюдается при продолжительности обработки, соответствующей 6...7 мин (рисунок 3.4) [21].



1 – обработка металлом-геттером; 2 – обработка фторцирконатом калия

Рисунок 3.4 – Зависимость газосодержания в расплаве от времени обработки

3.1.6 Рафинирование газофлюсовой смесью

При оценке технологических параметров процесса рафинирования алюминиевых расплавов газофлюсовой смесью для выяснения влияния расхода и давления продуваемого газа на характер и скорость подъема пузырьков из

расплава исследовали моделирование алюминиевого сплава водой, нагретой до 70...80 °С.

Установлено, что при внутреннем диаметре трубки 10 мм, давлении 0,01...0,02 МПа и расходе газа 1,5 л/мин обеспечивается невысокая скорость подъема пузырьков и создаются оптимальные условия рафинирования. Результаты исследований подтверждаются опытными плавками алюминиевого сплава АК7ч, АК8 с продувкой флюсом (мас. % NaCl – 33; FCl – 47; Na₃ AlF₆ – 20) в струе аргона.

Для рафинирования используют специальное устройство. Зависимость газосодержания расплава от времени продувки газифлюсовой смесью определялась при расходе флюса 50 г/мин (рисунок 3.5).

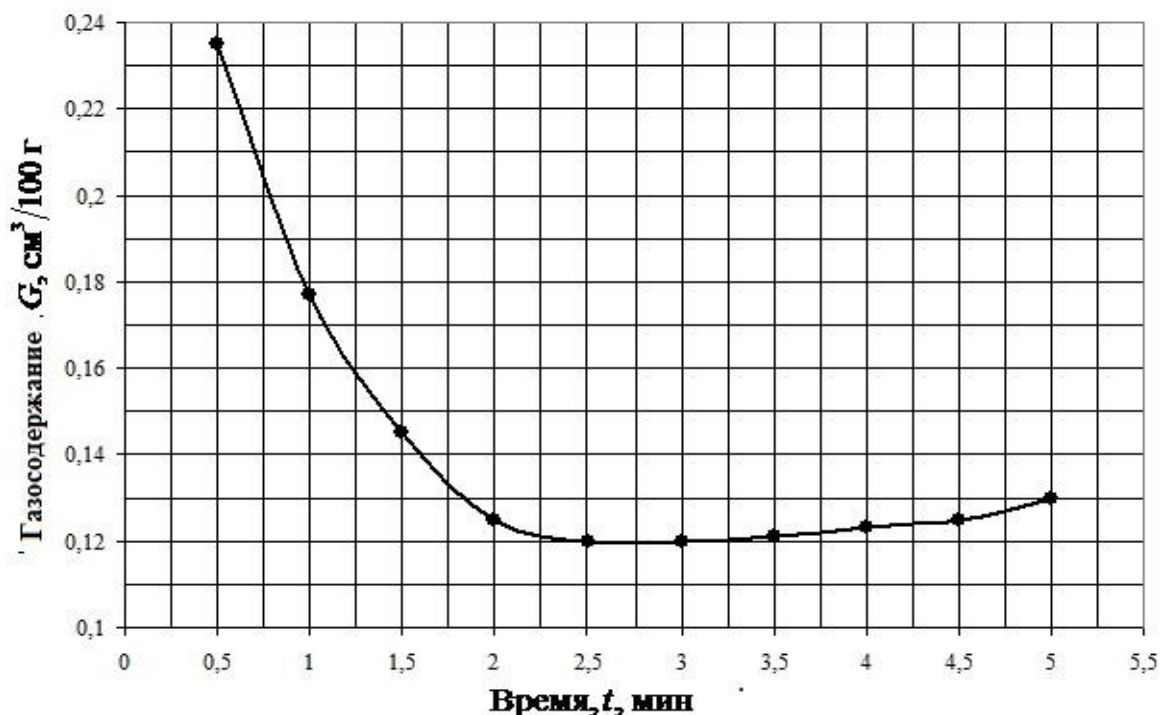


Рисунок 3.5 – Зависимость газосодержания в расплаве от времени продувки газифлюсовой смесью при расходе флюса 50 г/мин.

Как видно из рисунка 3.5, рафинирование расплава эффективно проводить в течении 2,5...3,0 мин. Макроструктура вакуумных проб соответствует первому баллу пористости по шкале ВИАМ.

3.1.7 Электровакуумное рафинирование.

Для определения оптимального режима электровакуумного рафинирования, заключающегося в одновременной обработке вакуумом и постоянным током, в центр тигля был погружен электрод из титанового стержня (катод), анодом служил тигель печи.[21]

При отработке параметров технологического процесса электровакуумного рафинирования расплава АК7ч установлено содержание газов в расплаве после вакуумирования при остаточном давлении $1,33 \cdot 10^3$ Па в течении 15 минут, которое составило $0,143 \dots 0,165$ см³/100 г (рисунок 3.6).

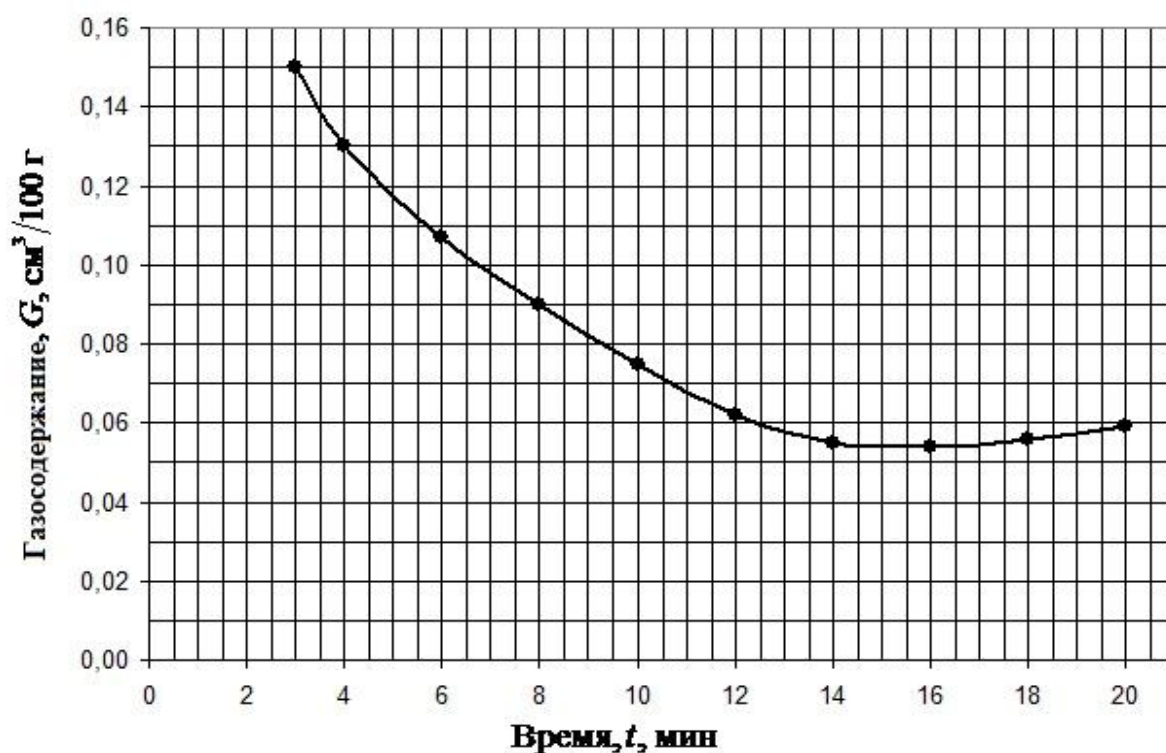


Рисунок 3.6 – Зависимость газосодержания в расплаве от времени обработки током

Затем устанавливалась зависимость газосодержания в расплаве от плотности пропускаемого через него постоянного тока ($0,015 \dots 0,08$ А/см²) при одновременном вакуумировании. Оптимальная плотность тока на аноде соответствует $0,04$ А/см².

После этого выявили оптимальное время (от 3 до 20 мин) электровакуумного рафинирования при постоянной плотности тока.

3.2 Модифицирование алюминиевых сплавов.

Известно, что модифицирование эвтектики в силуминах приводит к улучшению физико-механических свойств этих сплавов. В настоящее время известно более сорока элементов, оказывающих модифицирующее действие на структуру эвтектики в силуминах [22, 23, 24].

Например, по эффективным модификаторам эвтектики Al-Si являются: Na (0,1% (по массе)); Практическое применение в качестве классического модификатора, на постсоветском пространстве получил натрий, который вводится в сплавы обычно в виде фтористых соединений в составе флюсовых композиций. Использование в производственных условиях металлического натрия в связи с его повышенной химической активностью затруднительно.

Наиболее популярный тройной модифицирующий флюс имеет состав 40% NaCl, 45% NaF, 15% KCl. Его используют для обработки расплава силумина в количестве 1,5% от массы шихты при температуре 740–750°C. В результате реакции $6\text{NaF} + \text{Al} \rightarrow \text{AlF}_3 \cdot (3\text{NaF}) + 3\text{Na}$ происходит восстановление натрия, который действует как модификатор при формировании кристаллов эвтектического кремния.

Модифицирование двойным флюсом 67% NaF+33% NaCl в количестве 1–2% от массы металлозавалки ведут при температуре 780–810°C. Применение состава 62,5% NaCl + 25% NaF + 12,5% KCl, который вводится в количестве 1–2% позволяет снизить температуру модифицирования до 730–750°C. В результате обработки расплава силумина универсальными флюсами (50% NaCl; 30% NaF; 10% KCl; 10% Na₃AlF₆ и 35% NaCl; 40% KCl; 10% NaF; 15% Na₃AlF₆) совмещаются операции рафинирования и модифицирования. При их использовании отпадает необходимость в перегреве расплава, уменьшается время

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

обработки, снижается расход флюса [23].

Необходимо отметить, что использование натрия в качестве модификатора имеет ряд недостатков, таких как необходимость тщательного контроля дозировки модификатора, нарушение которой связано с опасностью получения частично модифицированной или перемодифицированной структуры, снижение жидкотекучести силумина, повышенный расход тиглей, увеличение склонности расплава к газопоглощению, развитие рассредоточенной газоусадочной пористости в отливках.

Но основной сложностью в работе с натрием является ограниченное время сохранения модифицирующего эффекта. Длительность эффекта модифицирования при использовании натрия, как правило, не превышает 30 мин, что связано с испарением и окислением легкоплавкого натрия.

В связи с этим, в литейных цехах зачастую приходится проводить дополнительное модифицирование расплава в раздаточных печах [10]. Кроме того, сплав, модифицированный натрием, чувствителен к переливу из одной емкости в другую, что связано с выгоранием натрия при переливах.

Другими общепризнанными модификаторами эвтектического кремния являются стронций и сурьма. Основным преимуществом данных элементов, по отношению к натрию, является высокая живучесть, т.е. большая длительность сохранения модифицирующего эффекта.

Так при введении в расплав силумина 0,05–0,06% стронция эффект модифицирования сохраняется более трех часов. Есть данные, что модифицирующий эффект после обработки расплава стронцием в количестве 0,08% от массы расплава сохраняется до 8 часов и даже после нескольких переплавов [7].

Сплав, модифицированный 0,001%, стронция содержит крупные пластинчатые кристаллы кремния. Структура металла остается немодифицированной до 0,016% Sr [24]. При повышении содержания стронция свыше 0,026% кристаллы кремния измельчаются и переходят в волокнистую

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

форму [23]. По данным работы [25] оптимальной добавкой является 0,005–0,010% Sr. При введении его свыше 0,010% наблюдается эффект перемодифицирования.

Наилучшие результаты при обработке расплава стронцием получены в тех случаях, когда ее проводили после дегазации металла (продувка C_2Cl_6) и в сочетании с продувкой металла аргоном, которую начинали одновременно с вводом модификатора и продолжали до выпуска металла из печи.

Стронций хорошо сочетается с натрием и дополняет его. В за рубежной цветнолитейной практике стронций в качестве модификатора эвтектического кремния применяется достаточно широко. В связи с тем, что ввод 42 стронция в расплавы силумина в металлическом виде затруднен из-за его самовозгорания, токсичности паров, необходимости повышения температуры расплава, что влечет за собой дополнительные энергозатраты, повышение газопоглощаемости, а также учитывая высокую стоимость стронция, в настоящее время для модифицирования эвтектического кремния используют стронцийсодержащие лигатуры или различные модифицирующие и универсальные флюсы, содержащие в своем составе соли стронция.

Чаще всего для введения стронция используют лигатуру Al–Sr (10% Sr), Реже используются лигатуры следующего состава: 10% Sr–14% Si – 76% Al; 90% Sr – 10% Al; 55% Sr – 45% Al и др. Известны также стронцийсодержащие универсальные флюсы, обладающие длительным модифицирующим эффектом. Применение лигатурного модифицирования в отечественном цветнолитейном производстве затруднено, в первую очередь, из-за высокой стоимости стронцийсодержащих лигатур.

Кроме того, применение в действующих технологических цепочках стронциевых лигатур создает дополнительные сложности, связанные с их высоким водородосодержанием, окисленностью, гигроскопичностью, а зачастую недостаточной эффективностью и необходимостью дополнительного их переплава и подготовки.

Используемые в настоящее время стронцийсодержащие флюсы содержат в

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

своем составе SrCl_2 , SrF_2 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, а также ряд других хлористых и фтористых соединений, что вызывает определенные трудности с решением экологических проблем.

Другим общепризнанным модификатором длительного действия является сурьма в количестве 0,2% . Модифицирующий эффект при ее вводе сохраняется до 4-х часов, но полностью снимается в присутствии натрия.

Увеличивать содержание сурьмы в магнийсодержащих силуминах выше 0,22% нецелесообразно, так как в них образуется хрупкая фаза Mg_3Sb_2 . Модифицирование силуминов сурьмой сопровождается улучшением жидкотекучести, уменьшением усадочной пористости и склонности к образованию трещин. При модифицировании сурьмой и висмутом не образуются тонкоразветвленные дендриты кремния кораллоподобной формы, не происходит сфероидизация поверхности его роста, как это наблюдается при вводе натрия или стронция.

В этом принципиальное отличие модифицирующего действия этих элементов от натрия и стронция. Если натрий и стронций при совместном введении усиливают эффект модифицирования эвтектики Al-Si , то сурьма и висмут проявляют несовместимость с натрием и стронцием.

По отношению друг к другу обе эти группы модификаторов являются демодификаторами. При соотношении концентраций, когда образуются Na_3Sb ; Na_3Bi ; Sr_3Sb_2 ; Sr_3Bi_2 , наблюдается огрубление структуры эвтектики. Она становится грубопластинчатой.

Исходя из вышесказанного, промышленное применение сурьмы в качестве модификатора эвтектики силуминов в цветнолитейных цехах на постсоветском пространстве пока не представляется возможным ввиду ее высокой токсичности, а также из-за того, что Sb является демодификатором в сплавах, модифицированных повсеместно применяемым натрием из-за образования соединения Na_3Sb . К числу модификаторов длительного действия относят также иттрий, который вводят в количестве 0,15–0,3% [22].

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

Отмечается также возможность и целесообразность модифицирования эвтектики в силуминах кальцием, что по сравнению с модифицированием натрием в меньшей степени приводит к образованию усадочных рыхлот. Кроме того, кальций резко усиливает действие натрия. Возможны модифицирования силуминов добавками РЗМ (до 1%), карбидами РЗМ. Установлено, что литий оказывает такое же модифицирующее влияние на кристалл кремния, как и стронций.

При содержании около 0,2% лития в сплавах возможно образование интерметаллических включений, а в отливках – образование пористости. Есть технология рафинирования и модифицирования силуминов 40%-ой иттриево-кремниевой лигатурой, модифицирование силицидами иттрия и гадолиния обеспечивают измельчение эвтектики и улучшение механических свойств отливок. Эффект модифицирования силуминов наблюдается при использовании церия, европия и эрбия.

Однако, большинство из опробованных альтернативных модифицирующих присадок на базе этих элементов не получило промышленного развития из-за различных технических и экономических трудностей.

Контролировать степень модифицирования эвтектики Al-Si- сплавов наиболее удобно на основе термоанализа затвердеваемой пробы (отливки).

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

4. ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

4.1 Схема технологического процесса.

Технологию литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) можно отнести к группе способов получения отливок в неразъемных формах по разовой модели. Но в отличие сходных способов модель удаляется (газифицируется) не до заливки, а в процессе заливки формы металлом, который, замещая испаряющуюся модель, занимает освободившееся пространство в полости формы. Современные варианты технологического процесса заключаются в следующем [26].

Разовые пенополистирольные модели изготавливают либо засыпкой в специальные металлические пресс-формы (массовое и крупносерийное производство) суспензионного полистирола в виде подвспененных гранул, либо механической обработкой нормализованных пенополистирольных плит (мелкосерийное, единичное производство).

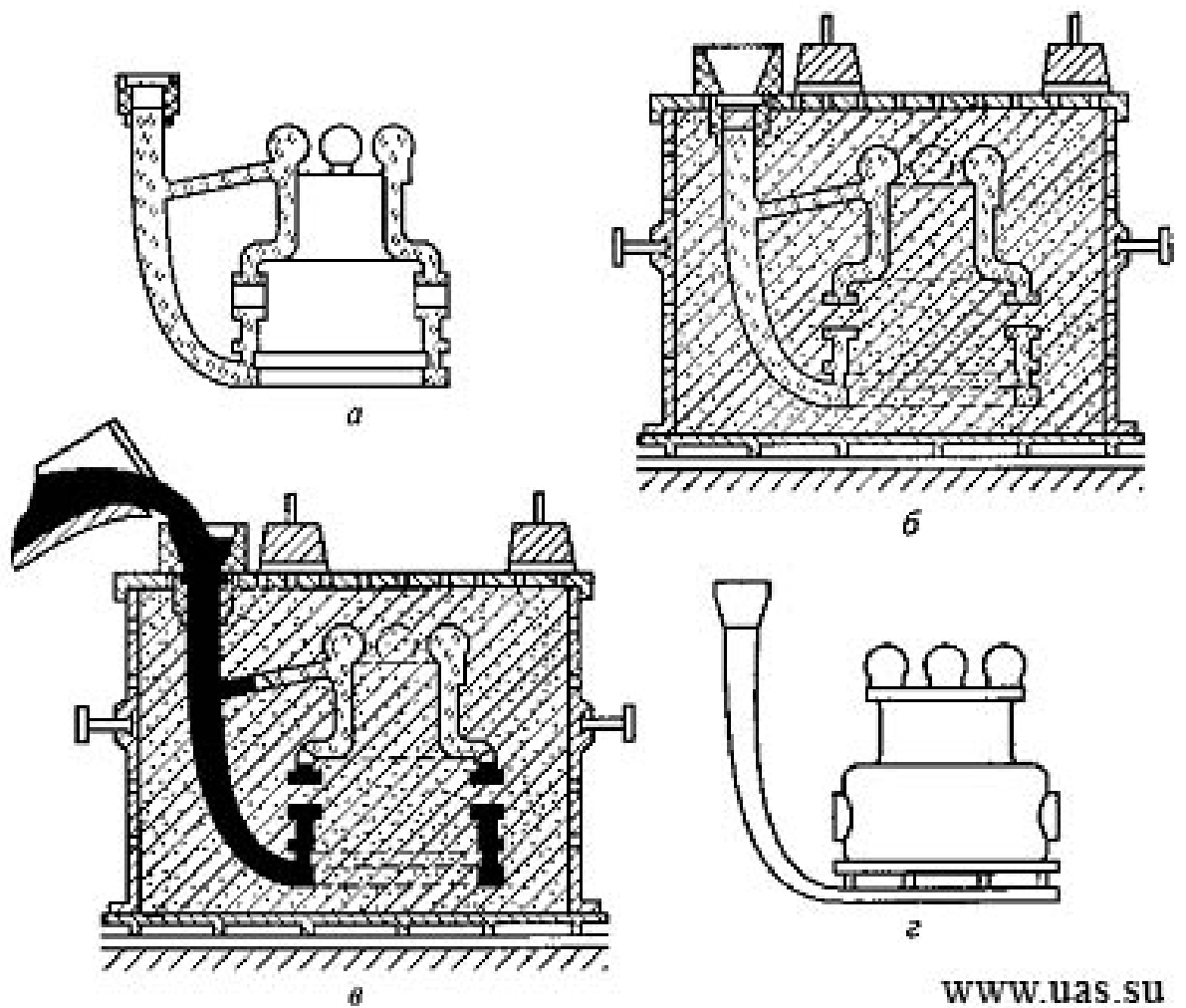
Сложные модели делают по частям. Отдельные части и литниковую систему соединяют в единый блок склеиванием или сваркой. Собранный модель окрашивают слоем огнеупорной краски и сушат на воздухе. В итоге получается огнеупорная газопроницаемая оболочка, прочно связанная с пенополистирольной моделью (рисунок 4.1, а).

Готовую модель устанавливают в специальную опоку–контейнер, засыпают зернистым огнеупорным наполнителем без связующего, уплотняют его вибрацией, закрывают металлической крышкой с отверстиями, нагружают и устанавливают литниковую чашу (рисунок 4.1,б).

При изготовлении сложных отливок контейнер после подачи опорного материала закрывают сверху полиэтиленовой пленкой, как при вакуумной формовке.

Чтобы уменьшить вероятность разрушения формы в ней создают разрежение до 0,04 – 0,05 МПа.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54



WWW.UAS.SU

Рисунок 4.1 – Схема изготовления отливки по газифицируемой модели: а – пенополистирольная модель отливки; б – форма, подготовленная к заливке; в – заливка формы, газификация модели; г – отливка с элементами литниковой системы

При изготовлении крупных массивных отливок используют обычные холоднотвердеющие жидкоподвижные или сыпучие формовочные смеси.

Приготовленную форму заливают жидким металлом (рисунок 4.1, в). Температура газификации пенополистирола близка к 560°C , поэтому под действием теплоты заливаемого расплава модель газифицируется. При этом полость формы постепенно освобождается и заполняется металлом.

После затвердевания и охлаждения отливки опоку–контейнер переворачивают, наполнитель отделяется от отливки и высыпается, после чего

отливка направляется на финишные операции (рисунок 4.1, г). В случае использования обычных формовочных смесей форму выбивают на выбивных решетках.

Главная особенность способа (применение неразъемной формы) определяет основное его преимущество для качества готовых отливок – повышение точности отливок благодаря сокращению числа частей формы, стержней, а, следовательно, и возможных искажений конфигурации и размеров отливок, связанных с изготовлением и сборкой этих элементов формы.

Точность отливок при литье по газифицируемым моделям в песчаные формы без связующего и с ним согласно ГОСТ Р 53464–2009 соответствует точности отливок, полученных в кокиле или в облицованном кокиле со стержнями[2, 26, 27].

В настоящее время литье по газифицируемым моделям чаще всего используется со следующими целями:

– изготовление средних и крупных массивных отливок в условиях опытного и мелкосерийного производства;

– изготовление сложных отливок из черных и цветных сплавов массой до 50 кг с повышенной точностью размеров в условиях серийного и крупносерийного производства. К таким отливкам можно отнести, например, отливку типа «блок цилиндров» для автомобильного двигателя.

4.2 Совершенствование газифицируемых моделей

4.2.1 Процессы получения пенополистироловых моделей

Материалом для изготовления газифицируемых моделей служит вспенивающийся полистирол, который представляет собой синтетический полимерный продукт суспензионной полимеризации стирола в присутствии эмульгатора, стабилизатора и порообразователя[28].

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

В качестве порообразователя чаще всего используют изопентан. Применяемые для изготовления моделей гранулы вспенивающегося полистирола представляют собой полупрозрачные или белые непрозрачные шарики диаметром до 3,2 мм с внешней твердой полистирольной оболочкой, внутри которой находится жидкая фаза – изопентан. Чем тоньше стенки модели, тем мельче должны быть гранулы вспенивающегося полистирола.

При нагреве до 27,9°C изопентан закипает и превращается в газ с увеличением объема, а при 80 – 90°C полистирольная оболочка размягчается и под действием давления газа деформируется. При этом объем гранул увеличивается в 10 – 40 раз. Этот процесс называется «вспениванием гранул полистирола».

При вспенивании гранул в замкнутом объеме они спекаются в монолитную массу, точно воспроизводящую конфигурацию ограничивающей ее рост конструкции.

Для изготовления отливок по газифицируемым моделям пенополистирол должен обладать следующими свойствами:

- при плотности 20 – 30 кг/м³ иметь достаточную технологическую прочность (0,1 – 0,2 МПа), чтобы сохранять размеры и конфигурацию моделей в процессе их изготовления, хранения, транспортирования и формовки;
- на всех стадиях технологического процесса иметь минимальную и стабильную усадку (0,15 – 0,2%);
- обладать достаточной скоростью газификации, чтобы заливаемый металл успевал заполнять полость формы до начала его затвердевания;
- при газификации разлагаться с минимальным содержанием коксообразующих продуктов во избежание появления засоров в отливках.

Процесс получения моделей в массовом и крупносерийном производстве состоит из двух стадий: предварительное вспенивание исходных гранул вспенивающегося полистирола в свободном состоянии и окончательное вспенивание гранул в замкнутой полости пресс-формы – получение модели.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

Предварительная тепловая обработка вспенивающегося полистирола необходима для получения впоследствии газифицируемой модели с заданной объемной массой (плотностью), которая определяет прочность модели и качество поверхности.

Вспенивающая способность гранул заданной дисперсности определяется температурой и временем тепловой обработки (рисунок 4.2).

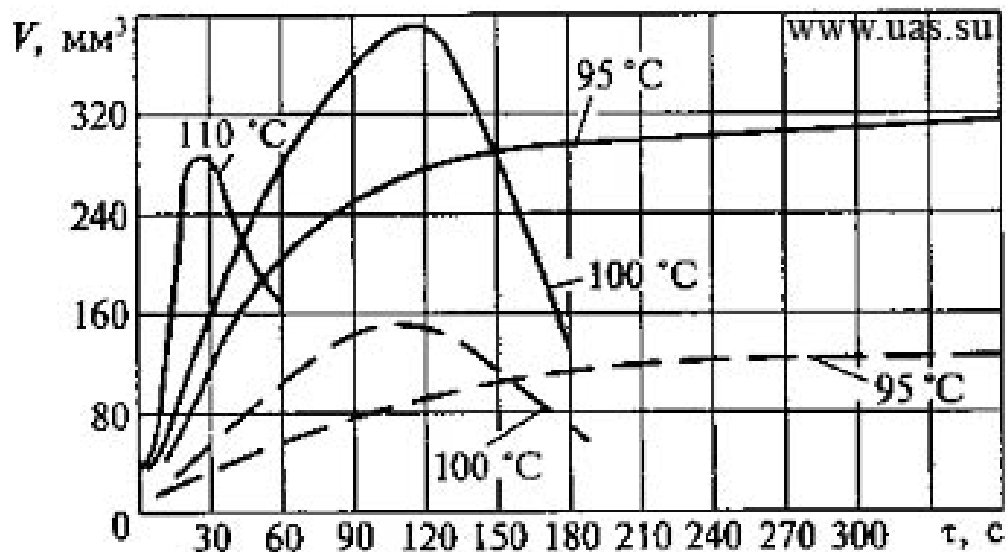


Рисунок 4.3 – Увеличение объема гранул пенополистирола (V) в зависимости от температуры (цифры у кривых) и продолжительности подвспенивания (t): сплошные линии – начальный размер гранул 2,5 мм; пунктирные – 1,5 мм

С увеличением продолжительности тепловой обработки объем гранул увеличивается и, соответственно, уменьшается насыпная масса подвспененных гранул. Повышение температуры обработки приводит к сокращению времени, при котором гранулы достигают максимального объема.

Но при температурах выше 95 °C процесс становится нестабильным и передержка гранул приводит к потере их активности и усадке. Это связано с увеличением скорости деформации полистирольной оболочки гранул при повышении температуры, в результате чего стенки отдельных ячеек гранул разрушаются и происходит потеря порообразователя.

На предприятиях с небольшим объемом производства предварительное вспенивание целесообразно проводить в горячей воде. Для этого исходные гранулы полистирола помешают в воду при температуре 95 – 100°С и выдерживают в течение 1 – 10 мин при постоянном помешивании, чтобы обеспечить равномерность тепловой обработки и исключить слипание гранул.

После выдержки, необходимой для подвспенивания гранул до заданной насыпной массы, их извлекают и засыпают на стеллажи с сетчатым дном для просушивания и выдержки на воздухе.

Для нагрева гранул при предварительном вспенивании применяют также обработку паром и токами высокой частоты. В условиях крупносерийного и массового производства чаще всего используют перегретый пар.

После предварительного вспенивания гранулы выдерживают на воздухе от 6 ч до 2 суток. В этот период оболочка гранул, охлаждаясь, вновь переходит в стеклообразное твердое состояние, а пары изопентана конденсируются, что приводит к возникновению вакуума в гранулах.

В процессе выдержки происходит диффузия воздуха внутрь гранул и давление выравнивается. Для сокращения времени выдерживания подвспененных гранул можно использовать выдержку их при повышенном до 0,2 – 0,3 МПа давлении.

Процесс изготовления моделей в пресс-формах заключается в повторном нагреве подвспененных и активированных гранул полистирола, помещенных в пресс-форму, в результате которого они окончательно вспениваются и спекаются между собой, образуя пенополистирольную модель отливки.

Подготовленные гранулы засыпают или задувают сжатым воздухом в смазанную специальной смазкой рабочую полость пресс-формы так, чтобы они полностью заполнили ее объем. Смазками служат: раствор синтетического термостойкого каучука, силиконовая жидкость, глицерин.

Нагрев гранул в крупносерийном и массовом производстве целесообразно проводить способом так называемого «теплого удара»: перегретый пар с

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

температурой 125 – 135°С под давлением 0,2 – 0,35 МПа подают непосредственно в пресс–форму, заполненную гранулами полистирола.

Проходя между гранулами, турбулентный поток пара интенсивно вытесняет воздух, находящийся в порах засыпки, и равномерно по всему объему нагревает полимерный материал, который окончательно вспенивается.

Образующийся конденсат под действием расширяющихся гранул отжимается к стенкам пресс–формы и удаляется через специальные дренажные отверстия.

При небольших объемах производства чаще используют более простые, но менее производительные способы:

– ванный, когда пресс–форма с подвспененными гранулами помещается в ванну с водой, нагретой до кипения. По окончании процесса пресс–форму охлаждают в проточной воде;

– автоклавный, когда перфорированная пресс–форма, заполненная гранулами, помещается в автоклав, куда подается «острый» пар под давлением 0,13 – 0,145 МПа при температуре 105 – 115°С.

Перфорация пресс–формы в виде отверстий в стенках диаметром 0,35 – 1,5 мм, а лучше щелей шириной 0,25 – 0,5 мм служит для подачи пара внутрь пресс–формы, а также для удаления воздуха и конденсата во время расширения и спекания гранул.

В качестве материала для изготовления моделей из пенополистирольных плит используют готовые пенополистирольные плиты марки ПС–Б и ПС–БС с габаритами до 1000 * 700 * 100 мм. Плотность плит 20 – 25 кг/м³, напряжения на изгиб 0,09 – 0,23 МПа при 5%-ной деформации; остаток после испарения образца не более 2 мас. %; скорость плавления около 25 мм/с.

Пенополистирол легко обрабатывается на обычных деревообрабатывающих станках. Чистовую обработку ведут при больших скоростях резания и малых подачах, используя инструмент с мелкой насечкой, тонкие наждачные круги и шлифовальную шкурку.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

Одним из способов обработки пенополистирола является обработка горячей электронагреваемой нихромовой проволокой. Температура нагрева режущей проволоки должна находиться в пределах 300 – 450°С.

Преимущество данного способа заключается в том, что гранулы пенополистирола не выкрашиваются, а оплавляются по поверхности разреза и закрывают поры.

Обычно сложные модели изготавливают из отдельных частей простой геометрической формы с последующим их склеиванием, термической сваркой или сваркой растворением пенополистирола.

Термическая сварка осуществляется с помощью струи воздуха, нагретого до 105 – 130°С. В качестве присадочного материала используют прутки из пенополистирола. Наплывы в местах сварки устраняют заглаживанием нагретым инструментом.

Для сварки растворением пенополистирол растворяют в стироле, толуоле, дихлорэтане до достижения консистенции киселя. Полученный состав наносят тонким слоем на соединяемые поверхности, при этом материал модели несколько растворяется.

После соединения поверхностей и выдержки в течение 8 – 10 мин под небольшим давлением образуется прочный однородный с материалом модели соединительный шов.

Пенополистирольные модели значительно дешевле деревянных, что особенно важно в единичном производстве. Время, затрачиваемое на их изготовление, в 2 – 3 раза меньше, при этом не расходуется древесина высокого качества.

4.2.2 Анализ и сравнение свойств материалов для газифицируемых моделей

На начальной стадии освоения и внедрения процесса литья по газифицируемым моделям предпринимались попытки использовать для

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

изготовления моделей различные пенопласты: полистироловые, полиуретановые, фенольно-резольные, полиэтиленовые, полипропиленовые.

Однако применение этих материалов для получения отливок привело к значительному ухудшению их качества из-за появления на поверхности большого количества коксового остатка, образующегося после газификации модели.

В таблице 4.1 представлены результаты исследования термофизических свойств пенопластов при высоких температурах [28].

Таблица 4.1 – Термофизические свойства пенопласто

Свойства пенопласта	Пенополистирол	Пенополиуретан	Фторопласт
Температура начала полимеризации, °С	120	190	140
Температура начала испарения (деполимеризации), °С	320	230	400
Температура горения, °С	560	580	780
Негазифицируемый остаток, %	0,015	14	44
Удельное газовыделение при 1000 °С, см ³ /г	105	730	600
Время горения образца, с	10...20	30...40	65...110

Из данных таблицы 4.1 следует, что пенополистирол в наибольшей степени удовлетворяет требованиям к пенопластам для изготовления газифицируемых моделей.

Однако применение обычного пенополистирола также не обеспечивало требуемого качества отливок.

Практика использования и исследования их свойств в процессе термической деструкции при заливке формы показали, что материалы для газифицируемых

моделей должны удовлетворять ряду требований.

Эти требования определяются особенностями формирования отливки, заключающимися во взаимодействии жидкого металла с моделью и продуктами ее разложения; технологией изготовления модели; технологией изготовления литейной формы; санитарно-гигиеническими требованиями.

Результаты исследований физико-химических процессов, происходящих при заполнении форм с газифицируемыми моделями, затвердевании и охлаждении отливок, анализ накопленного практического опыта и производственных данных по технологии изготовления моделей и форм позволяют сформулировать следующие требования к материалам для газифицируемых моделей.

а) По термодеструкционным характеристикам:

– температуры основных фазовых превращений материала (плавление, испарение, газификация) должны быть ниже температуры заливаемого металла;

– количество теплоты для осуществления основных фазовых превращений материала должно быть минимальным;

– скорости основных фазовых превращений материала должны быть такими, чтобы жидкий металл до момента кристаллизации мог заполнить форму, а количество образующихся жидкой и твердой фаз продуктов разложения было минимальным.

б) По физико-механическим характеристикам:

– при минимальной плотности прочность материала при сжатии и изгибе должна быть достаточной, чтобы сохранять заданные размеры и конфигурацию моделей при их изготовлении, хранении, транспортировке и формовке;

– упругое восстановление должно быть максимальным, а остаточные деформации минимальными, особенно при малых начальных деформациях;

– усадка на всех стадиях технологического процесса изготовления моделей должна быть минимальной, стабильной и мало зависеть от изменений технологических режимов.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

в) По технологическим характеристикам материал должен:

- хорошо перерабатываться в пресс-формах в плиты, блоки, фасонные изделия при минимальном технологическом цикле и энергетических затратах;
- обладать минимальной адгезией к поверхности пресс-формы и не вступать с нею в физико-химическое взаимодействие;
- хорошо обрабатываться резанием, строганием, шлифованием;
- хорошо смачиваться, но не растворяться клеями и противопожарными красками, сохранять хорошее сцепление после высыхания;
- обладать минимальной гигроскопичностью;
- обладать стабильностью свойств при хранении.

Количество и токсичность продуктов, выделяющихся на всех стадиях переработки материала от исходного продукта до готовой отливки любыми технологическими способами, должны быть минимальными.

Указанные группы требований к материалам для газифицируемых моделей являются наиболее общими, отражающими главные особенности технологического процесса [2, 28].

Применение специальных марок полистирола для изготовления моделей значительно улучшило их качество, однако не исключило причины образования специфических дефектов на поверхности отливок из стали в виде раковин, заполненных коксовым остатком.

Поэтому многие фирмы продолжали работы по созданию новых полимерных материалов для моделей и улучшению уже существующих марок литейного полистирола.

В Японии был получен материал для моделей, который представлял собой сополимер полиметилметакрилата и полистирола. Промышленное испытание нового материала при производстве отливок показало отсутствие на их поверхности следов коксового остатка [29].

Испытания нового материала проводила фирма «General Motors». Сравнительные испытания полиметилметакрилата при различных скоростях

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

нагрева до температуры 1400 °С представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Сравнительные результаты испытания материалов

Наименование модельного материала и условия эксперимента	Остаток по массе при скорости нагрева, %	
	1°С/с	700 °С/с
Пенополистирол	6,2	15,1
Полиметилметакрилат	0,3	1,8
Выдержка при температуре в процессе опыта, с	6,7	18
Атмосфера при опыте	Воздух	Азот

Из данных, приведенных в таблице 4.2, следует, что полиметилметакрилат обладает высокой скоростью газификации при минимальном кокосовом остатке, который в 20 раз меньше, чем у литейного полистирола.

4.2.3 Преимущества сополимера полиметилметакрилата с полистиролом

Сополимер содержит 70 % полиметилметакрилата (PMMA) и 30 % полистирола (EPS).

Преимуществами сополимера являются:

- отсутствие углеродных поверхностных дефектов на отливках;
- высокая размерная точность моделей;
- полное разложение на газообразные составляющие в процессе выжигания (отсутствие жидкой фазы).

Наличие в структуре связанного кислорода и отсутствие тяжелых радикалов способствуют быстрому протеканию процесса высокотемпературной окислительной термодеструкции PMMA с выделением главным образом газов при незначительном количестве свободного углерода.

Это было подтверждено натурными испытаниями при получении отливок

из углеродистой стали. При объемной плотности модели 20...27 кг/м³ объемное науглероживание стальной отливки не превышало 0,05 %, в то время как при литье по моделям из пенополистирола объемное науглероживание достигало 0,3 %.

Поэтому производство отливок по технологии ЛГМ, особенно из низкоуглеродистых сталей и высокопрочного чугуна, где проблема науглероживания стоит особенно остро, возможно только с применением литейных сополимеров.

Вспененная модель из сополимера изготавливается при помощи стандартного оборудования, предназначенного для вспенивания полистирола.

Сополимер обладает высокими свойствами пиролиза и выделяет минимальное количество вредных газов по сравнению с полистиролами. Поэтому технология ЛГМ с применением сополимера позволяет получить ощутимый экономический эффект за счет применения более простой системы очистки газов, выбрасываемых в атмосферу.

Материал обладает минимальной усадочной деформацией после формовки, что позволяет производить высокоточные отливки в течение достаточно большого времени хранения моделей.

Модели из сополимера обладают хорошими механическими свойствами, предотвращающими их деформацию и разрушение во время формовки в песок. При использовании сополимера существенно экономятся средства, связанные с регенерацией песка, так как загрязнение песка его продуктами распада примерно на 80% меньше, чем от продуктов разложения полистирола [28].

Вспенивающий агент (углеводородное соединение) имеет меньшую подвижность, чем пентан, и не выделяется из гранул так быстро, как пентан из пенополистирола, что увеличивает сроки хранения и уменьшает усадку моделей после их изготовления.

Физико-механические свойства сополимера и полистирола приведены в таблице 4.3.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

Таблица 4.3 – Физико-механические свойства сополимера и полистирола

Наименование материала	Зернистость, мм	Количество вспенивателя, %	Рекомендуемая плотность, г/л	Количество смазки, %
Полистирол	0,4 – 0,6	4,7 – 5,0	30 – 32	0,03
	0,3 – 0,4	5,0 – 5,5	25 – 28	0,03
	0,2 – 0,3	5,5 – 6,5	23 – 27	0,03
Сополимер	0,4 – 0,6	8,0 – 9,5	20 – 23	0,32
	0,3 – 0,4	8,5 – 9,5	21 – 25	0,32
	0,2 – 0,3	9,5 – 10,0	23 – 28	0,32

Вспенивание материала происходит в специальных автоматических вспенивателях, однако на практике не плохие результаты получены и в модернизированных автоклавах. Нормально вспенить сополимер в привычных ваннах практически не возможно.

Здесь следует заметить, что сополимер, по сравнению с полистиролом более чувствителен к температурному режиму, поэтому установленное давление и температуру пара, а также время вспенивания, особенно в автоклавах, необходимо строго выдерживать [26].

Очень важно чтобы процесс вспенивания сопровождался постоянным перемешиванием материала.

В результате предварительного вспенивания продуктов получается материал объёмной плотностью 20...35 кг/м³. При этом продолжительность процесса вспенивания не регламентирована, и зависит от необходимой плотности и от применяемого при этом оборудования. Температура стеклования РММА на 5 °С выше, чем у полистирола, поэтому вспенивание гранул необходимо производить при более высокой температуре.

Время "созревания" материала после предвспенивания составляет 24...48

часов. Время хранения предвспененного материала составляет до 96 часов. Эти величины зависят от окружающей температуры и плотности полученного материала [29].

Спекание моделей производится на специальных модельных автоматах или с использованием автоклавов. Относительно низкое давление используемого пара, составляющее 0,07...0,08 бар, является наиболее предпочтительным

Процессы пиролиза пеномоделей с разным содержанием метилметакрилата (0 % – полистирол, 70 % – сополимер, 100 % – полиметилметакрилат) были проанализированы при помощи термогравиметрических измерений.

Кривые пиролиза этих моделей при различных температурах приведены на рисунке 4.4.

Температуры пиролиза сополимера (CL600A) также низки, как и 100 % полиметилметакрилат (PMMA). Термогравиметрические измерения при реальном разлиновочном процессе не выявили практических различий в скорости разложения этих двух материалов на газовые составляющие [29].

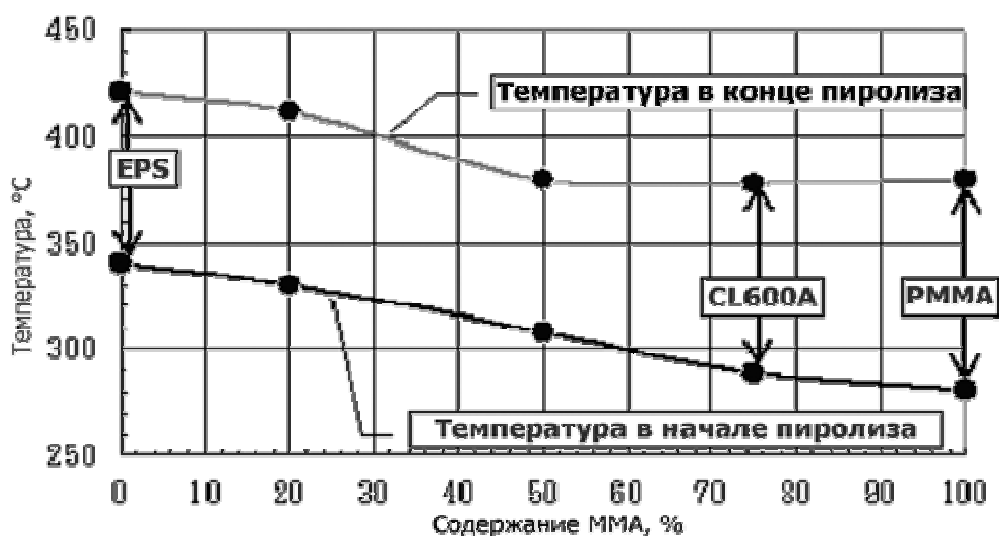


Рисунок 4.4 – Свойства пиролиза при плотности 25 кг/м³

На рисунке 4.5 показано количественные различия между газообразованием полистирола (EPS) и сополимера CL600A. Измерения проводились при выжигании моделей одинаковой формы, с одинаковым удельным весом 25 кг/м³.

Количество образованных газов при разложении сополимера CL600A в 2

раза больше чем EPS при температуре 700 °С, и в 1,5 раза больше при 1200 °С .

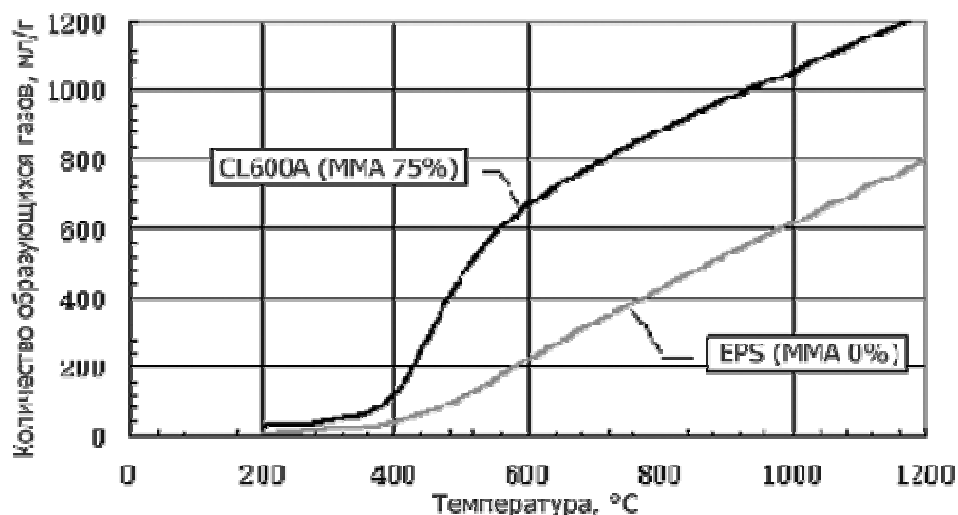


Рисунок 4.5 – Свойства газообразования пиролиза

В таблице 4.4 приведен состав газов (кроме неорганических CO₂, CO, H₂O), полученных в результате сгорания сополимера и полистирола. Пиролиз был выполнен в атмосфере азота и воздуха при температуре 700 °С.

Таблица 4.4 – Состав органических газов при декомпозиции

Наименование	Сополимер		Полистирол	
	В азоте, %	В воздухе, %	В азоте, %	В воздухе, %
Стирол	10,8	0,1	38,7	1,1
Бензол, толуол, ксилол	0,4	0,0	10,6	1,4
Метилэтилкетон	9,8	0,0	0,0	0,0
Метилметакрилат	3,2	0,0	0,0	0,0
Другие	38,0	2,9	31,0	3,7
Всего	62,2	3,0	70,3	6,2

В азотной среде полистирол разложился на ароматические составляющие, главным образом на стирол, сополимер распался на органические газы, содержащие атомы кислорода. В воздушной среде продукты разложения материалов сополимер и полистирол также отличаются качественно и

количественно.

Очевидно, что процесс сжигания сополимера в отличие от полистирола является экологически чище, что приводит к дополнительной экономии средств на установку и содержание сложных систем очистки выбросов в атмосферу.[31]

На рисунке 4.6 показано сравнительное количество выделяемой золы при сгорании полистирола и сополимера.



Рисунок 4.6 – Процесс горения

Сополимеры обладают минимальной усадочной деформацией, что позволяет применять их при производстве высокоточных отливок. На рисунке 4.7 отображены сравнительные процессы усадочной деформации сополимеров CL500A, CL600A, и полистиролов марки FMC505, FMC605 после изготовления модели.

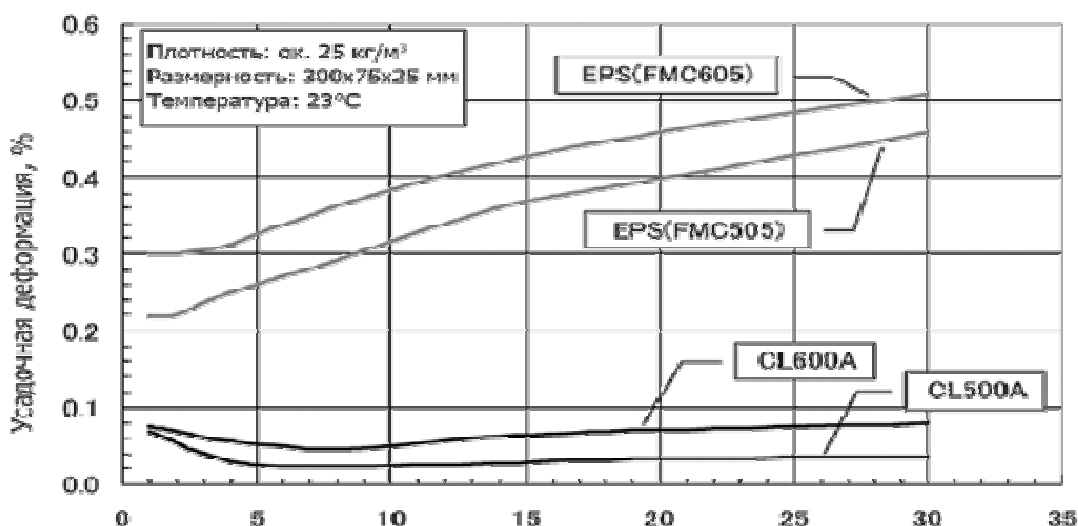


Рисунок 4.7 – Усадочная деформация

Точность размеров модели в процессе старения должна быть максимально стабильной. Поэтому следует знать оптимальные условия хранения моделей. На рисунке 4.8 приводятся сравнительные характеристики процесса усадочной деформации моделей, изготовленных из материала CL600A при их содержании в различных температурах.

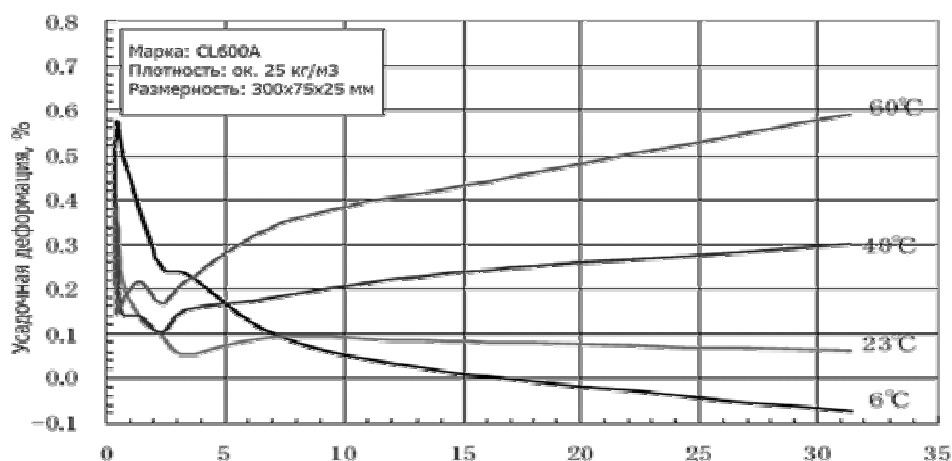


Рисунок 4.8 – Усадочная деформация при различных температурах

Из графика видно, что температура 23 °С является наиболее приемлемой для хранения моделей. Явно выраженные поверхностные углеродные дефекты в отливках приведенных на рисунке 4.9, отлитых по полистироловым моделям, абсолютно отсутствуют на однотипных изделиях произведенных с использованием моделей из сополимера [29,31].

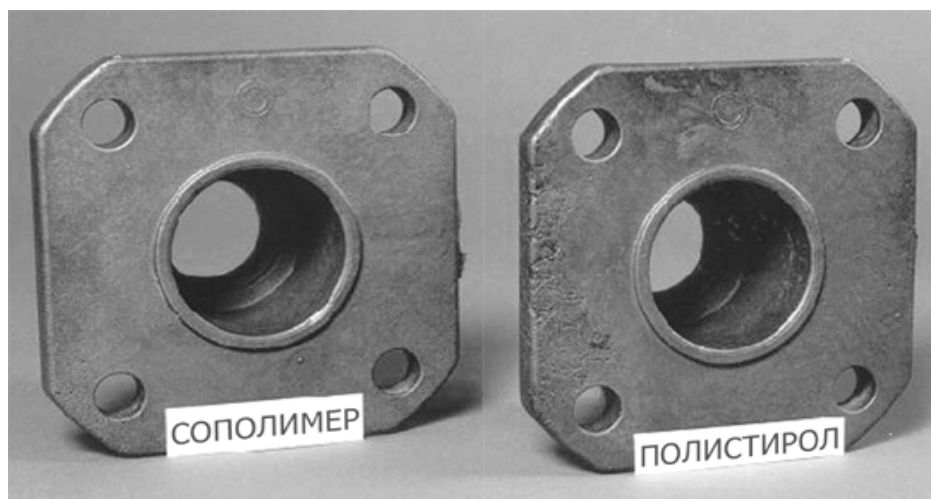


Рисунок 4.9 – Качественное сравнение однотипных изделий, отлитых

на модели из сополимера и полистирола

При разработке технологии следует учитывать следующие особенности сополимеров:

– модели из сополимера отличаются невысокой механической прочностью и легко деформируются под нагрузкой, поэтому плотность моделей необходимо повышать в 2 – 3 раза, а это приводит к увеличению объема выделения газов.

– высокая скорость термодеструкции моделей при производстве отливок из черных металлов требует при применении форм из кварцевого сухого песка увеличения скорости заливки металла. Поэтому форма и покрытие должны иметь высокую газопроницаемость, а также следует повышать гидростатический напор металла при его заливке в форму и вакуум.

В конце необходимо заметить, что для литья стали по технологии ЛГМ применение сополимера метилметакрилата и полистирола является незаменимым. Однако наилучших результатов при этом можно достичь только с использованием современного оборудования [2].

Собранные модели и модельные блоки покрывают противопригарной краской или суспензией толщиной 0,2 – 2,0 мм. После сушки покрытие предохраняет отливку от пригара и повышает прочность модели.

К недостаткам литья по газифицируемым моделям можно отнести безвозвратные потери материала разовой модели и выделение токсичных продуктов ее термодеструкции, что требует проведения соответствующих защитных мероприятий. В варианте процесса с вакуумированием формы во время ее заливки продукты термодеструкции модели могут поступать непосредственно из формы в установку для каталитического их дожигания до диоксида углерода и паров воды.

4.3 Технологический процесс изготовления отливки «Корпус»

Рассмотрим технологический процесс изготовления отливки «Корпус»

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

(рисунок 4.10) из сплава АК7.

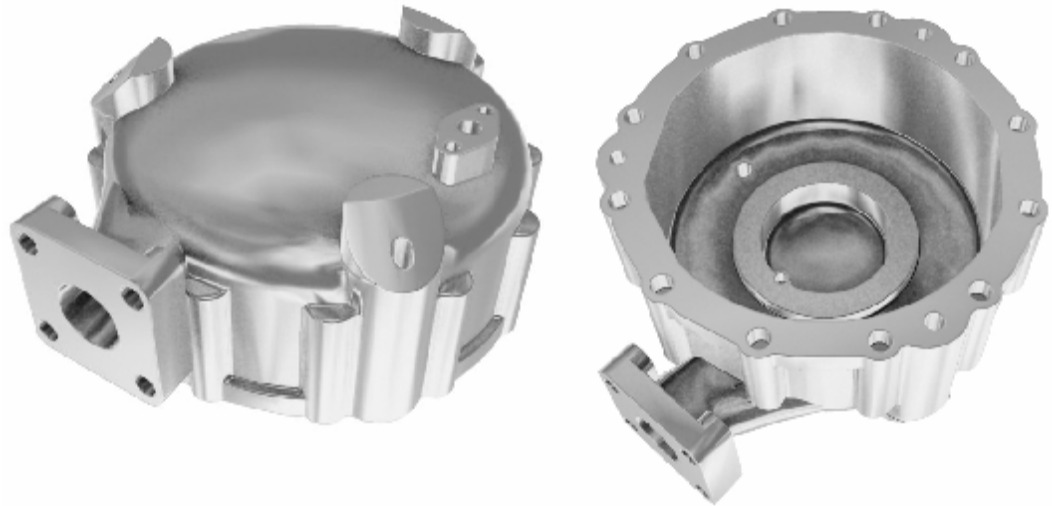


Рисунок 4.10 – Внешний вид изделия «Корпус»

При разработке технологии изготовления отливок методом ЛГМ необходимо учитывать, что литейная форма не имеет разъема (рисунок 4.11).

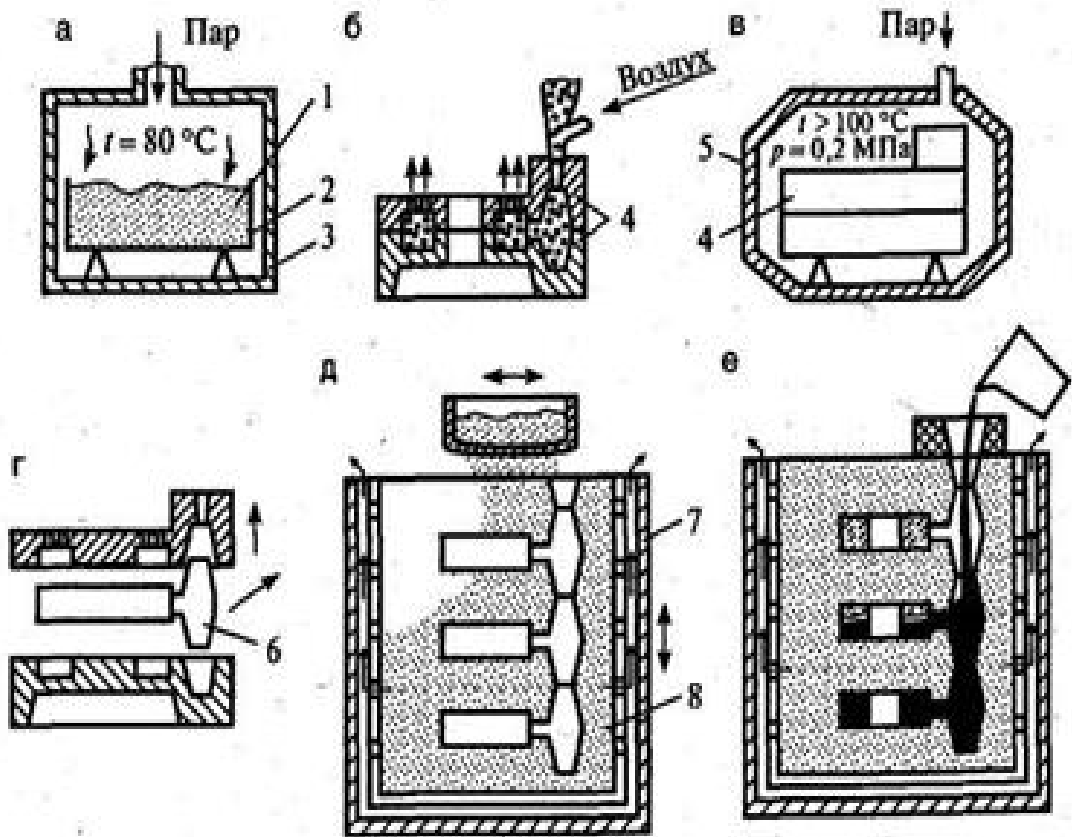


Рисунок 4.11 – Литье по газифицируемым моделям: а – подвспенивание гранул полистирола; б – заполнение пресс-форм; в – вспенивание и спекание

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

22.04.02.2017.255.00.00

Лист

73

гранул; г – извлечение модели; д – формовка моделей; е – заливка форм

Литейные свойства (жидкотекучесть, формозаполняемость) сплава АК7 при температурах заливки 750...780 °С и минимальной толщине стенки 10 мм, обеспечат проливаемость «корпуса». Наиболее рационально осуществлять производство отливок литьем по одной из разновидностей способа ЛГМ – POLICAST–процессу.

Этот способ специально разработан для получения алюминиевых отливок в условиях серийного и крупносерийного производства. POLICAST–процесс предусматривает следующие особенности /26/:

- сборку отливок в куст на центральном стояке;
- совместное протекание процессов заполнения опоки наполнителем и его виброуплотнения;
- вакуумирование формы во время заливки.

Таким образом, изготовление детали «корпус» литьем по газифицируемым моделям по POLICAST–процессу, позволит максимально быстро получить качественную отливку при минимальных затратах на оснастку, формовочные материалы и технологическое оборудование.

Модели изготавливаются из сополимера CL600А на термопластавтоматах.

Сборка моделей отливок на центральном стояке, являющегося прибылью во время затвердевания, позволяет избежать дополнительных затрат на оформление литниковой системы.

При построении блока отливок на центральном стояке, в большинстве случаев питание отливки осуществляется напрямую от стояка через питатель. Шлакоуловитель в таких литниковых системах выполняется редко, так как снижает эффективность питания стояка.

Таким образом, отливка «Корпус» располагается максимально близко к центральному стояку, а питатели подводятся к механически обрабатываемым поверхностям. Готовые части моделей склеивают между собой, а затем готовые модели отливки «корпус» приваривают к центральному стояку.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

Рационально использовать в качестве противопригарного покрытия краску DISOPAST 7061, представляющее собой керамическое покрытие на водной основе для применения в технологии производства отливок по газифицируемым моделям (LOST FOAM).

Покрытие разработано специально для отливок из алюминия и алюминиевых сплавов. Покрытие гарантирует высокую термостойкость, газопроницаемость и обеспечивает при правильном применении безупречную поверхность отливки без дефектов.

Для покрытия DISOPAST 7061 характерны /32/:

- высокая адгезия к поверхности большинства полистирольных моделей;
- высокая стойкость к истиранию после высыхания;
- низкая осаждаемость при эксплуатации и перевозке;
- легкое удаление с поверхности отливки.

Технические свойства /32/:

- базовый наполнитель огнеупорный силикат;
- жидкая фаза вода;
- содержание наполнителя, % не менее 65;
- плотность (при 20°C), кг/м³ 1480;
- вязкость (по чашке Форда 6 мм), с 12...15;
- толщина покрытия на вертикальных поверхностях, мм 0,5...0,9.

На модельные блоки окунанием наносят противопригарное покрытие DISOPAST 7061 и отправляют в проходное сушило

Вывод продуктов термодеструкции, газов, выделяющихся из расплава, пары воды осуществляется за счет вакуумирования всего объема формы в период заливки, а так же высокой газопроницаемости противопригарного покрытия и наполнителя. Поэтому положение модели отливки «Корпус» во время заливки, мало влияет на интенсивность отвода газовой фазы из полости формы.

При ЛГМ по POLICAST–процессу, модель не извлекается из полости формы, и вся неразъемная форма размещается в одной опоке. Наличие

неразъемной формы является одним из достоинств ЛГМ, так как позволяет повысить точность литья, избежать литейных швов и заусенцев, ускорить подготовку формы к заливке.

Литниково-питающая система служит для обеспечения заполнения литейной формы металлом с оптимальной скоростью, исключающей образование в отливке недоливов и неметаллических включений, и компенсации объемной усадки в период затвердевания отливки с получением в ней металла заданной плотности (рисунок 4.12).

Количество отливок в блоке определяется габаритными размерами корпуса и максимальной высотой центрального стояка – 800 мм.

Литниковая система типа – «центральный стояк», не только облегчает автоматизацию процессов сборки, формовки и транспортировки модельных блоков и блоков отливок, но и в большинстве случаев позволяет избежать применения прибылей и холодильников (в особенности при литье силуминов).



Рисунок 4.12 – Литниковая система для отливки «корпус»

Для формовки модельного блока корпусов используются опоки высотой 1000 мм и диаметром 800 мм. Применение вибрации при формовке в трех плоскостях делает возможным заполнение протяженных и разветвленных каналов

модели.

В формовочном модуле реализуется метод высокочастотной вибрации, заключающийся в создании колебаний с низкой амплитудой и высокой частотой, это позволяет повысить уплотняемость наполнителя и сократить время формовки. Кроме этого при таком режиме вибрации огнеупорный наполнитель приобретает свойства тяжелой псевдожидкости, что позволяет получать качественные формы для сложных отливок

Заливка блока «корпусов» осуществляется с помощью автоматического дозирующего комплекса. Опока с заформованным модельным блоком перемещается от формовочного модуля к заливочному столу, где подключается к системе вакуумирования. При достижении глубины вакуума в форме 0,05...0,08 МПа, с помощью пневматического дозатора производится заливка порции расплава с температурой 750...780 °С.

После окончания заливки форма выдерживается 20...30 секунд на заливочном столе, для удаления газовой фазы продуктов термодеструкции модели. Затем опока с блоком отливок перемещается на участок охлаждения линии. Время охлаждения составляет 25...30 минут.

Затем производится выбивка, наполнитель высыпается из опоки и поступает на регенерацию, а блок направляется в камеру дробеструйной отчистки, где удаляются остатки противопопригарной краски и огнеупорного наполнителя. Очищенные отливки транспортируются на термообрубной участок, где происходит отделение отливок «корпус» от центрального стояка.. Затем отливки подвергают термообработке.

Первоначально закалка (нагрев до 535 ± 5 °С, выдержка при этой температуре в течение 2 часов и резкое охлаждение в воде с температурой 20...100 °С), затем неполное искусственное старение (нагрев до 150 ± 5 °С, выдержка при этой температуре в течение 3 часов и охлаждение на воздухе).

Термообработанные отливки зачищают от остатков литников на станке и подвергают контролю. Все внешние макродефекты определяются при визуальном

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

контроле качества отливок на этапе опилки и зачистки отливок. Неисправимый брак отливок отправляется на переплав, а исправимые дефекты устраняются с помощью аргонно-дуговой сварки. После рентгенконтроля качественные отливки отправляются на склад.

Таким образом, литьё по газифицируемым моделям представляется перспективным многофакторным процессом, специфику и особенности которого необходимо учитывать при получении точных и качественных отливок. Отмечена мировая тенденция дальнейшего развития ЛГМ как универсального способа, отличающегося высокой производительностью, ресурсоэнергосбережением, низкими трудозатратами.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алюминиевые сплавы занимают лидирующее положение среди цветных сплавов по объемам производства литых деталей. Важнейшими факторами получения качественных алюминиевых изделий являются применение современных технологических процессов плавки, рафинирования, модифицирования.

В настоящее время применяются такие методы как очистка алюминиевых сплавов продувкой газами, фильтрованием, вакуумирование жидкого металла, рафинирование расплава солевыми композициями, рафинирование металлом-геттером, рафинирование газофлюсовой смесью.

Наиболее эффективным способом является продувка инертным газом в плавильной печи.

Литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) является одним из новейших способов производства отливок, появившихся в результате научно-технической революции во второй половине XX.

Такая технология, названная литьем по газифицируемым моделям, решала важнейшую задачу литейного производства — повышение точности отливок до уровня литья по выплавляемым моделям при издержках производства литья в песчано-глинистые формы.

Преимущества технологии литья по газифицируемым моделям(ЛГМ):

- возможность выпуска отливок сложной конфигурации;
- высокая точность получаемых отливок даже при сложной конфигурации;
- возможность получения тонкостенных стальных отливок;
- качество и плотность металла в отливке обеспечивается за счет частичного вакуумирования в процессе литья;
- высокое качество поверхности отливок, (Rz40), позволяет в некоторых случаях совсем отказаться от механической обработки, которая была бы

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79

необходима при другом способе изготовления;

- минимальный припуск на механическую обработку, если она всё же необходима;

- полная идентичность деталей в серии.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дибров И.А. Состояние и перспективы направления развития литейного производства России/труды XII (12) съезда литейщиков России. Нижний Новгород, 2015.– с 3–14.
2. Шуляк, В.С. Литье по газифицируемым моделям. – СПб.: НПО Профессионал, 2007. – 408 с.
3. Дибров И А Перспективы развития технологии точного литья по газифицируемым моделям / И А ДИБРОВ //Литейщик России , 2012 –№12 с. 8 – 10
4. Дорошенко , В С .ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ УПЛОТНЕНИЕ СУХИХ ФОРМОВОЧНЫХ НАПОЛИТЕЛЕЙ /В .С ДОРОШЕНКО //Литье и металлургия 2013.№2(70) с .15. 21
5. Дорошенко, В С 3D–технология для формовки и литья , В .С ДОРОШЕНКО //Литье и металлургия 2015.№3(80) с .30. 39
6. Rossacci J. Beat Fusion in Polystyrene foams /J.R ossacci, S. Shivkumar// journal of Materials science .2003 T, 38 №2 PP.201–206
7. Khodai, P. Pressure Measurement and some observation in lost foam casting / М .Khodai N Parvin //journal of Materials processing technology 2008 T 206 №1–3 pp.1–6
8. Альтман М.Б. Структура и свойства легких сплавов. – М.: Наука, 1971.– 105с
9. Белов М.В. Исследование процесса кристаллизации Al–Si сплавов и разработка легкоплавких фосфорсодержащих лигатур с целью повышения качества литых поршневых заготовок: Дис.канд.техн. наук: 05.16.04 / М.В. Белов. – М., 2007. – 119 с.
10. Макаров Г.С. "Плавка алюминиевых сплавов статус и перспектива". Международная научно–техническая конференция" г. Киев. 8–9.10.2002. с. 367–372.
11. Петров С.М., Петрова С.Г. Флюсы для алюминиевых сплавов //

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

Современные литейные материалы и технологии получения отливок: Тез. докл. науч.-техн. конф.– Л.: Знание, 1991.– С.54–55. 156

12. Эскин Г.И. Влияние кавитационной обработки расплава на измельчение структуры слитков легких сплавов // Труды V международной научно-практической конференции “Прогрессивные литейные технологии”. – М., 2009.– С. 44–48.

13. Макаров Г.С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами. – М.: Металлургия 1983. – 118 с

14. Курдюмов А.В., Инкин С.В., Чулков В.С., Графас Н.И. Флюсовая обработка и фильтрование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – С. 68–149.

15. Коротков В.Г. Рафинирование литейных алюминиевых сплавов. – М.:Свердловск, Машгиз, 1963.– 127 с.

16. Альтман М.Б., Глотов Е.Б., Засыпкин В.А. и др. Вакуумирование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 240 с.

17. Пименов ЮЛ. О характере взаимодействия алюминия с водородом // Технология легких сплавов.– 1969. – № 2. –С. 66–70

18. Ловцов Д.П. Влияние неметаллических включений на образование газовой пористости // Литейное производство. – 1955.– №12.– С.18–20.

19. Иванов В.П., Спасский А.Г. Влияние окислов алюминия на процессы газонасыщения и газовыделения в алюминиевых сплавах //Литейное производство. – 1963. – № 1. – с. 26–28.

20. Газы в цветных металлах и сплавах / Д.Ф. Чернега, О.М. Бялик, Д.Ф. Иванчук, Г.А. Ремизов.– М.: Металлургия, 1982.–72с. 157

21. Якимов, В.И. Исследование процесса рафинирования сплавов : автореферат дис. канд. физ. – мет. наук / В.И. Якимов. – Комсомольск-на-Амуре, 2000. – 21 с.

22. Кочеткова, Л.П. Металлургические процессы в машиностроительном производстве: учебное пособие / Л.П. Кочеткова. – Киров: Металлургия, 2004. –

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

184 с.

23. Производство отливок из сплавов цветных металлов: Учебник для вузов / А.В.Курдюмов, М.В.Пикунов, В.М.Чурсин, Е.Л.Бибииков.– М.: Металлургия, 1986.– 416с.

24. Белов Н.А., Белов В.Д. Экономнолегированный высокопрочный силумин АКЧ8 для головок цилиндров дизельных двигателей // Труды V международной научно-практической конференции “Прогрессивные литейные технологии”. – М., 2009.– С. 74–76.

25. Никитин В.И., Курилкин Д.А., Никитин К.В. Наследственное влияние структур лигатуры Al+10%Sr на модифицируемость бинарного доэвтектического силумина // Труды V международной научно-практической конференции “Прогрессивные литейные технологии”.– М., 2009.– С. 88–92.

26. Шуляк В.С. О состоянии и развитии производства отливок литьём по газифицируемым моделям в России. Доклад в сб. трудов 1-й Международной научно-практической конференции «Литьё по газифицируемым моделям», – СПб.: 2007.– 58 с.

27. Озеров В. А., Шуляк В. С., Плотников А. П. Литье по моделям из пенополистирола.– М.: Машиностроение, 1970 .– 422 с.

28. Мацяс Ю. А. Пенополистирол и его применение в технологии ЛГМ// Литье по газифицируемым моделям: Сб. тр. Первой международной научной конференции.– СПб, 2007.– С 48 – 52.

29.Союз–Литье [Электронный ресурс]/ ООО «Союз–Литье»–Электрон. Дан.– Режим доступа: [www. lityo. com. ua](http://www.lityo.com.ua), свободный. – Заглавие с экрана.

30. Литье по газифицируемым моделям: инженерные монографии по литейному производству/под ред. Ю.А. Степанова. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с.

31. Технология литейного производства в литейках малого размера. Технологические особенности и проблемы. Полезная и справочная информация для литейщиков. <http://liteika-no-one.blogspot.com/2015/11/clearpor.html#more>.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83

32. FATA ALUMINIUM–LOST FOAM SISTEM [Электронный ресурс]/
FATA Group–Электрон. Дан. – Режим доступа: [www. fataaluminium. com](http://www.fataaluminium.com),
свободный. – Заглавие с экрана.

					22.04.02.2017.255.00.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84