

Федеральное государственное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Материаловедения и технологий обработки материалов
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ _____
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 20 __ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

22.03.01.07 Материаловедение и технологии материалов в машиностроении
код и наименование направления

Исследование процесса получения литых заготовок из пеноалюминия
тема

Научный руководитель

подпись, дата

Выпускник

подпись, дата

Нормоконтролер

подпись, дата

В.Г. Бабкин

инициалы, фамилия

И.О. Ганюгина

инициалы, фамилия

Л.А. Свечникова

инициалы, фамилия

Красноярск 2019

Федеральное государственное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Материаловедения и технологий обработки материалов
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ _____
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 20 __ Г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

Студенту Ганюгиной Ирине Олеговне.

Группа МТ 15-01Б. Направление (специальность) 22.03.01
«Материаловедение и технологии материалов».

Тема выпускной квалификационной работы «Исследование процесса получения литых заготовок из пеноалюминия».

Утверждена приказом по университету № 19099/с от 19.12.2018 г.

Руководитель ВКР: В.Г. Бабкин, профессор, д. т. н., кафедра МиТОМ.

Исходные данные: научные публикации и патенты (список использованных источников), алюминий технический ГОСТ 11069–2001, медь М1 ГОСТ 859–2001, цинк гранулированный ГОСТ 989–75, кальций гранулированный, магний ГОСТ 804–93, порошок гидроксида титана, температурный интервал кристаллизации сплава Al–Cu–Zn–Mg – 500–530 °С.

Перечень разделов ВКР: аннотация, реферат, введение, обзор литературы по проблеме, методы изготовления образцов и их исследования, экспериментальная часть.

Руководитель ВКР

подпись

В.Г. Бабкин

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

И.О. Ганюгина

инициалы, фамилия

« ____ » _____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

В современном мире с каждым днем возрастает потребность в разработках и усовершенствовании новых материалов, одним из которых является пеноалюминий. Данный вид высокотехнологичного конструкционного материала привлекает свое внимание сочетанием физических и механических свойств, благодаря которым открывается широкий диапазон области применения вспененного металла.

В представленной бакалаврской работе выбран способ получения пористого алюминия с применением порообразователя TiH_2 .

Ключевые слова: пеноалюминий, пенометалл, порообразователь, порофор, вспениватель, закрыто- и открытоячеистый алюминий.

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа по теме «Исследование процесса получения литых заготовок из пеноалюминия», содержит 37 страниц, 19 рисунков, 1 формулу, 2 таблицы, 26 используемых источников.

Цель работы: Провести сравнительный анализ научных публикаций и патентов по методам получения пористых металлических материалов и разработать технологию получения пористых литых и деформируемых изделий из сплавов на основе алюминия.

Задачи:

- 1 Проанализировать литературные источники по теме исследования.
- 2 Изготовить опытные образцы пористых отливок из технического алюминия с применением гидрида титана.
- 3 Выбрать состав и технологию получения пористых конструкционных материалов и сплавов системы Al–Cu–Zn–Mg.
- 4 Изготовить опытные образцы литых и деформируемых материалов, содержащих гидрид титана и подготовить их к термообработке для вспенивания.

В ходе работы был проведен ряд исследований. Проанализировав несколько литературных источников, было выделено три основных метода получения пористого литого алюминия: введение газа напрямую в жидкий металл, литье в водорастворимые соли, вспенивание с порообразователем. В основу экспериментов был выбран метод вспенивание с порообразователем.

Первый эксперимент базировался на использовании технического алюминия с добавлением порообразователя – дигидрида титана TiH_2 . Результатом является малая пористость, поэтому для устранения данного недостатка был проведен другой опыт. Он заключается в приготовлении алюминиевого сплава системы Al–Cu–Zn–Mg, введении вспенивателя, прокатки полученных образцов и дальнейшей их термической обработки. Трудностью описанной технологии является отсутствие в патенте таких параметров как: температура при обработке давлением и время выдержки в печи при термообработке. Поэтому было принято решение провести две плавки: один образец разделить на две части и подвергнуть одну холодной деформации, вторую – горячей при температуре 350 °С; второй образец термически обработать без пластической деформации. Результаты экспериментов представлены в работе.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Обзор литературы по проблеме.....	9
1.1 Введение газа напрямую в жидкий металл	12
1.2 Литье в пористый каркас их водорастворимых солей	17
1.3 Вспенивание с порообразователем	20
2 Методы изготовления образцов и их исследования.....	24
3 Экспериментальная часть.....	29
Заключение	34
Список использованных источников	35

ВВЕДЕНИЕ

Пористый литой алюминий – высокотехнологичный материал, получаемый методом пропитки наполнителя с последующим его экстрагированием [1].

Основными технологиями для получения пенометаллов являются литье и порошковая металлургия [2]. Первый способ является наиболее экономичным и заключается во введении в расплавленный металл порообразующего элемента, называемого порофором. В качестве порофора (*blowing agent* – вспениватель) чаще всего выступают гидриды TiH_2 , MgH_2 , ZrH_2 , карбонат кальция CaCO_3 и углекислый газ.

Пеноалюминий классифицируют на закрыто- и открытоячеистый [3]. В качестве самого распространенного материала является закрытоячеистый пенометалл. Благодаря своей структуре он обладает меньшей плотностью, чем чистый алюминий, в связи с чем находит широкое применение в судостроении, ракетостроении, самолетостроении.

Алюминию не зря присваивают прозвище «крылатый металл», его сплавы сочетают в себе высокие механические свойства и низкий вес. Пеноалюминий можно назвать его улучшенной версией, поскольку плотность снижается на 30–85 % в зависимости от способа получения [4].

Одним из первых зарегистрированных способов получения пористого металлического материала является патент США «Способ получения пенометаллов», опубликованный в 1948 г. [2]. Процесс начинается в нагревании металла при атмосферном давлении, сплавов или минералов, или смеси металлов до температуры находящейся в промежутке между ликвидус и температурой, достаточной для образования пара, содержащегося в смеси летучего материала. После давление понижают и расплавленная масса вспенивается. Конечной операцией является ее охлаждение, формируемое пористый металл.

Применение литейной технологии для получения пенометалла, считающееся одним из первых изобретений в России, описано в авторском свидетельстве ССР № 125682, выданное в 1960 г [2]. Вначале алюминиевый расплав подогревают в печи-миксере до 600 °С и непрерывно перемещают по лотку с обогревом. В это время из бункера по трубке через дозатор в расплав непрерывно вводится один из гидридов металла: TiH_2 , ZrH_2 , LiH . Его перемешивание в интенсивном режиме происходит в смесительной камере, которая установлена в печи. Расплав перемешивается с помощью пропеллерной мешалки. Далее металл поступает из камеры в электропечь, в которой температура достигает пределов 650–700 °С – это обеспечивает пенообразование расплава у выхода из печи. Затем пенорасплав поступает на кристаллизатор, движущийся непрерывно и выполненный в виде бесконечной ленты из латунной сетки, где он и охлаждается путем подачи воды.

Заинтересованность во вспененном алюминии возросла с начала 1990-х гг. В это время начинают проводиться европейские конференции, где главной обсуждаемой темой выступает пенометалл, а с 1999 г. – регулярно (в интервале двух лет) международные конференции по машиностроительным технологиям,

проблемам производства и фундаментальным соотношениям между структурой и свойствами ячеистых металлов и пенометаллов (*MetFoam*). В 2019 году она будет проводиться 20–23 августа в городе Дирборн, штат Мичиган, США [5].

В качестве перспективы металлическая пена обладает рядом преимуществ: малый вес, хорошие теплоизоляционные и звукопоглощательные свойства; также вспененный металл не токсичен и не горюч.

Современные способы получения пеноалюминия методом литья в лабораторных и производственных масштабах в большей степени выявлены за границей, в России данное производство находится на стадии разработки. Именно по этой причине необходимо исследовать данный материал будущего и найти способы решения введения его в массовое и серийное производство.

1 Обзор литературы по проблеме

Пенометаллы приобретают наибольший интерес благодаря сочетанию физических и механических свойств. Например, высокая жесткость может спокойно совмещаться с низкой плотностью (низким удельным весом) или же высокая газопроницаемость гармонирует с высокой теплопроводностью. Стоит обратить внимание на низкую гигроскопичность, которая характеризует морозостойкость и отсутствие трещин при перепаде температур. Демпфирующая способность, то есть способность поглощать энергию удара и вибрацию, также высокая степень звукопоглощения и технологичность, которая допускает возможность формировать из пенометалла объемные конструкции – все эти характеристики позволяют применять изделия из данного материала в различных отраслях машиностроения: в строительной индустрии; в конструкциях металлорежущих станков; в автомобильной промышленности (конструктивные элементы); в судостроении (изготовление корпусов пассажирских судов, элеваторные и антенные платформы); в аэрокосмической отрасли (титановые и алюминиевые сэндвич-панели и некоторые детали турбин); в общественном городском транспорте [2].



Рисунок 1 – Свойства пенометаллов

Если говорить о механических свойствах, то они определяются количеством, формой, размерами и характером распределения пор по объему. Поскольку процесс порообразования не поддается управлению технологическими параметрами, то получить вспененные изделия с одинаковыми размерами пор и их закономерным распределением в металле невозможно. Исходя из этого, большой трудностью является получить отливки с близкими характеристиками механических свойств. Однако существует возможность спрогнозировать свойства пенометаллов с использованием математически точного метода случайных секущих для подсчета размеров и количества пор. В за-

вершении оценки пористости на нескольких сечениях образцов можно оценить размеры, количество и распределение пор в объеме металла [6].

В работе [7] для статических испытаний на сжатие в условиях одноосного напряжения использовали образцы цилиндрической формы ячеистого алюминия с диаметром пор 4 и 6 мм и длиной, отличающейся от длины образцов в состоянии поставки.

Первый этап сопровождался деформированием перемычек между порами, находящимися в плоскости приложения нагрузки. Он характеризуется линейной или близкой к линейной зависимостью напряжений от деформации. Второй этап связывают с пластическим уплотнением образцов, его характеризуют практически постоянным эффективным напряжением для ячеистого алюминия. Третий этап обладает резким возрастанием эффективных напряжений при относительно малых деформациях. Данный этап сопровождается дальнейшим заполнением пустот в образцах.

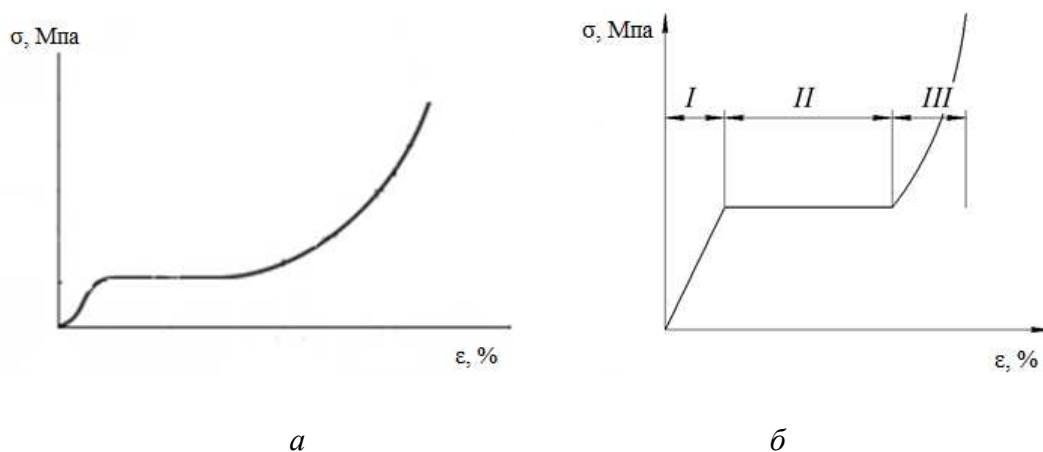


Рисунок 2 – Диаграмма уплотнения:
а – образца закрытоячеистого алюминия;
б – идеализированная

Диаграммы напряжение-деформация образцов пеноалюминия могут являться базой для расчета амортизирующих свойств, которые представляют способность ячеистого алюминия к ослаблению (изоляции) ударных воздействий. Наряду с термином «амортизирующие свойства», также широкое применение уделяется определению «демпфирующие свойства».

Демпфер – это устройство, служащее для уменьшения (демпфирования) или предотвращения вредных механических колебаний [7].

Амортизатор – устройство для смягчения ударов в конструкциях машин и сооружений в целях их защиты от сотрясений и больших нагрузок [7].

Из вышеописанных терминов следует, что присутствует различие в физических свойствах. У конструкционных металлов демпфирующие свойства определяются модулем упругости и упругими постоянными, а проявляются при низких напряжениях, которые намного меньше предела текучести метал-

ла. Амортизирующие свойства пенометаллов проявляются при больших пластических деформациях, возникающих при пластическом уплотнении.

В идеализированной диаграмме упругая стадия деформирования *I* уплотнения вспененного алюминия соответствует амортизатору-аналогу без начальной затяжки с постоянной жесткостью. *II* стадия – уплотнительно-пластическая – амортизатору, работающему при идеальных условиях. Пластическая стадия, указанная на диаграмме под номером *III* – амортизатору-аналогу с жесткой нелинейной характеристикой.

Не стоит также и забывать о возможных дефектах при получении пеноалюминия. Как описывают в [1], основными являются образование газовой раковины, всплытие частиц наполнителя (основной причиной которого является различие плотностей расплава и наполнителя), просечки и непропитка. В качестве наполнителя используют различные виды водорастворимых солей.

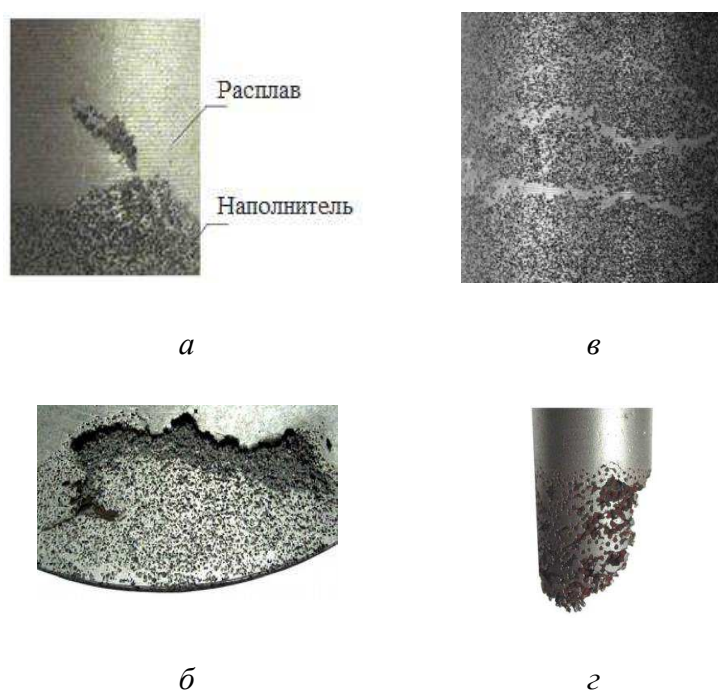


Рисунок 3 – Дефекты пеноалюминия:
а – всплытие наполнителя; *б* – газовая раковина;
в – просечки; *г* – непропитка

Для борьбы с *всплытием наполнителя*, в основу которой входит устойчивость частиц на поверхности, помогают несколько факторов. Первый заключается в сцеплении частиц воздушными частицами, аналогию которого можно провести с вакуумными присосками. Вторым фактором – снижение тела гидростатического давления расплава на частицы за счет площади, занимаемой воздушными манжетами. Соблюдая эти два фактора всплытие частиц возможно лишь при динамическом воздействии струи расплава, при таком условии частицы отрываются большими конгломератами [1].

Поскольку фронт давления по границе расплав-наполнитель не является равномерным, то образуются локальные потоки расплава. В связи с этим, в

местах повышенного давления оказываются окруженными расплавом, вследствие чего возникают *газовые раковины*, являющиеся недопустимым дефектом. Поэтому всегда следует учитывать, что у стенки кокиля скорость течения газа всегда будет ниже, чем в объеме. К другому дефекту, который формируется в верхней части отливки по причине низкой теплопроводности, относится *усадочная раковина*. Прибыльная цельнометаллическая часть отливки в процессе кристаллизации затвердевает быстрее и захватывает композиционную часть. Если попытаться увеличить теплопроводность композиционной части за счет повышения количества расплава в композите, то изменения окажутся незначительными. Лучшим решением окажется увеличение доли наполнителя.

Просечки – дефект в виде прожилок металла, образующийся при изготовлении композиционной литой заготовки. Повышенное давление (гидравлический удар) является причиной резкой остановки сплава в момент окончания пропитки. При воздействии на водонасыщенные малосвязанные или несвязанные грунты ударной нагрузкой или вибрацией происходит разрушение структуры с переупаковкой частиц. В местах сжатия стоячей ударной волны гидравлического удара образуется консолидация жидкости и нарушается связность каркаса солей. Обычно они не оказывают существенного влияния на технологические свойства отливок из пеноалюминия, так как расположены параллельно потоку фильтруемой среды. Но для объема продаж деталей из пенометалла – это является важным фактором [1].

Непронитка – неполное заполнение композиционной литой заготовки из-за недостаточной жидкотекучести сплава в капиллярных зазорах наполнителя. Избежать данный дефект позволяет изотермическая пропитка.

1.1 Введение газа напрямую в жидкий металл

Процесс, именуемый *Alcan N. Hydro*, был разработан международной программой ММС (композиционные материалы с металлической матрицей). В качестве вводимых веществ, служащими для увеличения вязкости, применяют карбид кремния SiC или оксид алюминия Al₂O₃ в количестве 5–20 % [8].

В алюминий, нагретый до температуры плавления, внедряют керамический упрочнитель. С помощью вращающейся крыльчатки в полученную смесь вводят газ (азот, аргон или воздух). Далее происходит вытяжка вспененной субстанции на алюминиевой фольге с помощью ленточного транспортера. В результате получают пеноалюминий с пористостью от 80 до 97 %.

К недостаткам описываемого метода, схема которого показана на рисунке 4, можно отнести плохую обрабатываемость полученной пены, являющейся причиной высокого износа режущего инструмента, по причине содержания керамических частиц.

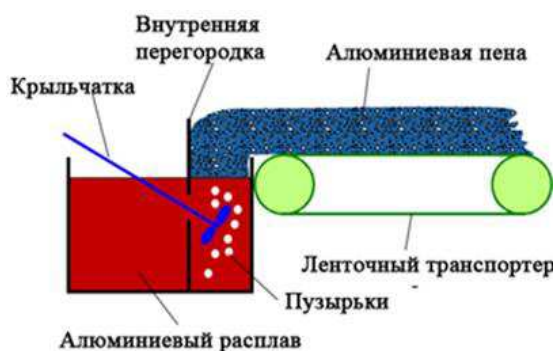


Рисунок 4 – Схема технологии введения газа в жидкий металл

Одним из видов метода введения газов напрямую является работа [9], где смешивание и вспенивание расплава осуществляют диспергированием в потоке разреженного газа с непрерывным сжатием получаемой смеси до атмосферного давления. Это происходит в течение времени, не превышающего время релаксации формы частиц диспергированного расплава, с последующим поддержанием статического давления в потоке диспергированного расплава, равным атмосферному.

Металлическая пена образуется благодаря быстрому сжатию газометаллической дисперсной смеси до атмосферного давления (в процессе образования) с последующей выдержкой статического давления в потоке пены (до кристаллизации, равным атмосферному).

Наиболее благоприятным условием для образования пены металлического расплава является использование лопастного механизма типа воздушного винта при скорости вращения 100 оборотов в минуту ($1,7 \text{ с}^{-1}$) с периферийным приводом. Он обеспечивает диспергирование расплава в газе при непрерывном сжатии смеси за время, не превышающее время динамической релаксации (не менее $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$) «лепестковой» формы частиц в сферическую.

По этой технологии процесс получения пенометалла осуществляется без применения порообразующих (в большинстве случаев дорогостоящих) и добавок, уменьшающих коэффициент поверхностного натяжения и увеличивающих вязкость расплава. Дисперсность пор составляет 2–3 мм в диаметре и является однородной, пористость высокая, приблизительно 90 %.

Полученный описанным методом пеноалюминий позволяет обеспечить функциональные (малый удельный вес, теплоизоляция, звукопоглощение, поглощение электромагнитных волн, плавучесть, амортизация ударов, виброизоляция), декоративные и конструкционные свойства при высокой эффективности и технологичности производства для различных отраслей промышленности [9].

В патенте [10] поток сжатой дисперсной смеси расплава металла с газом подают под уровень расплава под давлением, превышающем сумму металлостатического и атмосферного давлений. При этом вытесняют область

расплава смесью, прилегающую к месту подачи диспергированной смеси, а часть непрерывно отводят и охлаждают до затвердевания.

Главным преимуществом описываемого процесса получения вспененного материала является возможность автокорректировки кратности пены за счет сброса излишков газа при барботаже или через газоотводящую трубку.

В этом случае используют: обогреваемый смеситель с дозаторами газа и расплава, содержащий с периферийным приводом винт; кристаллизатор в виде цилиндрической изложницы, который перемещается вертикально. Процесс литья осуществляют периодически, до заполнения изложницы.

Данная технология позволяет получить пеноалюминий с высокой пористостью (порядка 90 %), управляемым интервалом дисперсии пор 2–3, 2–7, 5–7 мм с различной степенью однородности в зависимости от назначения материала.

В изобретении [11] в качестве порообразователя используют двуокись углерода, а в качестве упрочняющих частиц – огнеупорные. Матрицей может быть расплавленный композиционный материал из алюминия или алюминиевого сплава, упрочненный интерметаллическими или керамическими частицами.

Способ получения основывается на подаче тонко диспергированного газа с целью образования пор в металлическую матрицу расплавленного композиционного материала, упрочненную частицами. Пузырьки газа поднимаются вверх и образуют пористый материал, постепенно увеличивающийся в объеме. Разрушение пор при достижении поверхности расплава не наблюдается, что указывает на стабильную поверхность пузырьков газа. Верхняя часть массы металла переходит в твердое состояние, благодаря чему ее можно легко удалить.

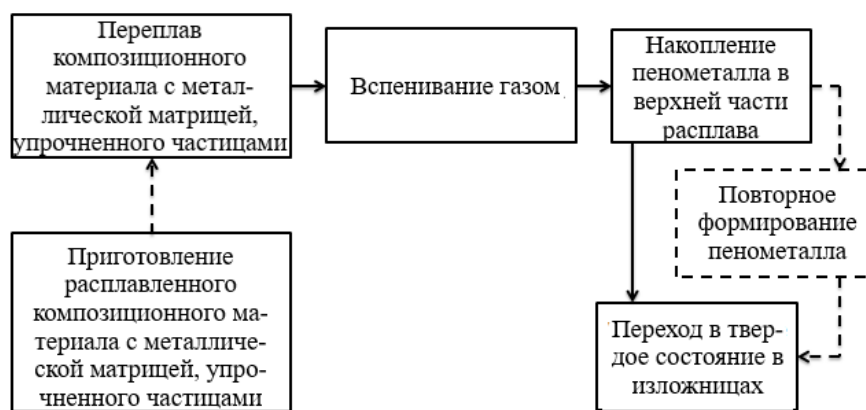


Рисунок 5 – Технологическая схема получения пенометалла

Допускается возможность удаления пенометалла в твердожидком состоянии. При этом нет изменения ячеистой структуры по причине высокой вязкости полученного вспененного металла. Это является главным преимуществом, с помощью которого возможно осуществление непрерывной передачи полутвердого пенометалла в изложницы. На этой стадии материал подвергают формованию, что обеспечивает гибкость в отношении конечной формы полупродуктов вспененного металла.

К достоинствам описываемой технологии можно отнести отсутствие требований к давлению температуре или равномерному распределению пузырьков газа во время вспенивания и перехода в твердое состояние. Также сюда можно отнести обогащение низкосортного композиционного материала из скрапа. Это представляет решение проблемы, поскольку, на данный момент, не существует возможности его переплавить или включить в рециркулированный вторичный алюминий [11].

В работе [12] в качестве газа используют двуокись кремния в виде аэросила. Здесь поток расплава диспергируют в потоке аэрозоля, содержащего ультрадисперсные частицы твердого, адсорбирующего газ, вещества, а статическое давление увеличивают до атмосферного в потоке диспергированной смеси перед охлаждением.

Интересными являются результаты регулирования статического давления. В потоке после торможения при статическом давлении намного меньше атмосферного происходит инжекция газа в поток и разрывы (из-за неустойчивой системы). Если статическое давление больше атмосферного, то развивается неустойчивость системы с частичным выходом газа из расплава. Если же оно равно или находится в диапазоне $-3 \dots +3$ кПа, то осуществляется наиболее благоприятный режим для устойчивости полученной металлической пены.

Причинами использования аэросила являются: представляет собой дополнительный источник порообразующего газа; соответствует требованиям к использованию в качестве загустителя; недефицитен.

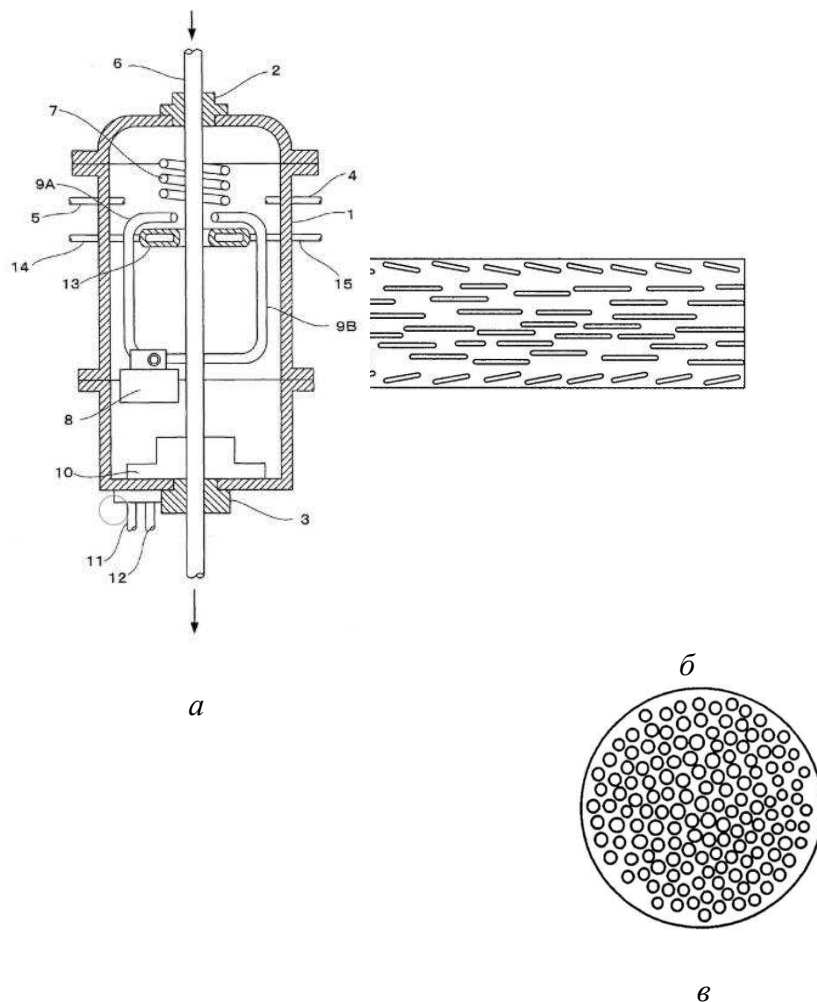
Следует обратить внимание на *метод плавающей зоны* [13]. Процесс получения пористого металлического тела, указанный на рисунке 5, включает в себя следующие операции. Сперва вакуумируют воздухонепроницаемый контейнер через вытяжную трубу. Далее в него подают инертный и растворяющийся газ по трубе для подачи газа до тех пор, пока давление в воздухонепроницаемом контейнере не достигнет заданной величины. Контейнер герметично закрыт при помощи уплотнителей.

Заготовку подают в контейнер с заданной скоростью и нагревают с помощью катушки высокочастотного нагрева, с целью частичной непрерывной плавки. В окружающей атмосфере растворяющийся газ проникает в расплавленный участок металла. Далее, пройдя область нагрева, заготовку охлаждают, тем самым способствуя переходу расплавленного состояния в твердое.

В таком состоянии в результате выделения растворенного газа из расплавленного металла образуются пузырьки. Они располагаются в продольном состоянии, благодаря чему обеспечивается получение пористого металлического тела. Его удаляют из устройства через уплотнитель.

Устройство снабжено тремя видами охлаждающих механизмов с целью охлаждения исходного металлического материала. В первом, газ в контейнере циркулирует с помощью установки для дутья и выдувают на исходный металлический материал из труб для дутья. Во втором механизме происходит охлаждение концевой участка исходной заготовки путем циркуляции охлаждающей воды по трубам с помощью охлаждающего блока. Третий меха-

низм используется с целью контактного охлаждения водой, циркулирующей по трубам с применением охлаждающей рубашки в форме кольца. Такие параметры как: диаметр и форма пор, пористость и другие – возможно регулировать, применяя один и более описанных механизмов, а также допускается возможность естественного охлаждения [13].



1 – воздухонепроницаемый контейнер; 2, 3 – уплотнители; 4 – вытяжная труба; 5 – труба для подачи газа; 6 – исходный материал; 7 – катушка высокочастотного нагрева; 8 – установка для дутья; 9А, 9В – трубы для дутья; 10 – охлаждающий блок; 11, 12 – трубы для циркуляции охлаждающей воды; 13 – охлаждающая рубашка в форме кольца; 14, 15 – труба для циркуляции охлаждающей воды;

Рисунок 6 – Способ получения пеноалюминия:
а – схема устройства; б и в – продольное
и поперечное сечение образца

В качестве исходного материала возможны металлы: алюминий, медь, никель, железо, уран, свинец, олово, молибден, гафний, цирконий, палладий, платина, золото, серебро, титан, бериллий, хром, марганец, вольфрам, кобальт, магний и их сплавы. Это дает основание на обширную область применения, что является немаловажным преимуществом описываемой технологии.

К достоинствам можно отнести: высокую механическую обрабатываемость, свариваемость, высокая удельная прочность и облегченный вес.

Подведя общий итог описываемых методов, можно сделать вывод о том, что способ «введение газа напрямую» является неблагоприятным для использования в промышленности по причинам неоднородности порового пространства и неравномерного распределения пор.

1.2 Литье в пористый каркас из водорастворимых солей

Данный способ характеризуется использованием следующих действий. В предварительно разогретую форму с водорастворимой солью (например, NaCl) заливают расплав алюминия, который заполняет полости между гранулами. Температура сплава должна быть ниже температуры плавления соли. Важно также учитывать тот факт, что присутствие химического взаимодействия водорастворимых солей и расплава алюминия категорически не допустимо. Далее полученную отливку после затвердевания извлекают из формы и промывают под напором воды для удаления солевых гранул. Заключительным этапом является сушка, после чего получают пенометалл с открытыми порами.

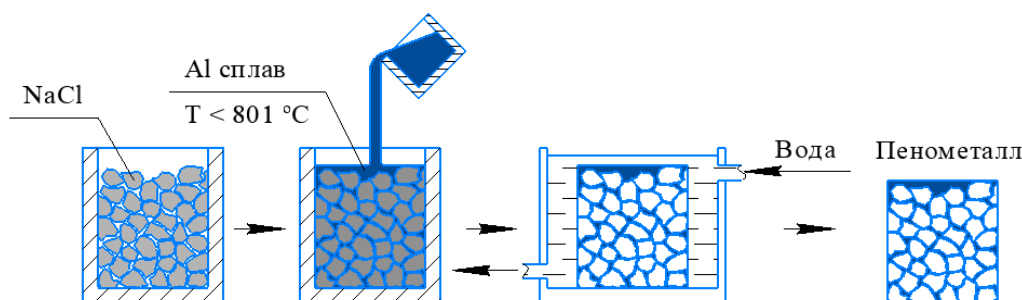


Рисунок 7 – Схема получения пеноалюминия

К описываемому методу относится достаточное количество работ, в одной из которых [14] в качестве водорастворимых солей применяют: или хлорид кальция, или фторид калия, или хлорид бария. Их плотность, как правило, выше плотности алюминиевого расплава, что не позволяет всплывать гранулам при заполнении.

К достоинствам описываемого метода относят: снижение себестоимости, расширение номенклатуры изделий, а также получение однородной пористости (используя одинаковые гранулы), что повышает качество вспененного алюминия. Простота способа позволяет применить технологию в промышленности. Недостаток проявляется в том, что гранулы при хранении теряют прочность, что является причиной их разрушения при заливке, что приводит к ухудшению требуемого качества.

Отличительной особенностью патента [15] является использование солей: бромид или йодид кальция (бария). Это позволяет повысить качество

изделий из пеноалюминия и уменьшить трудоемкость операции удаления солей по причине увеличения их растворимости в воде и снижении нерастворимого остатка в порах.

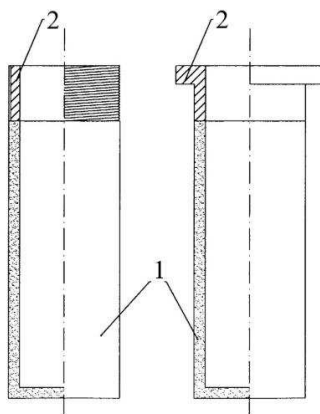
В изобретении [16] используют водорастворимую смесь из соды и желатина, в соотношении: желатин – 0,5–5 %; сода – 95–99,5 %. Желатин выполняет функцию связующего и обеспечивает получение гранул с высокой прочностью. К преимуществам этой технологии можно отнести регулируемый размер пор и стабильную пористость. Также следует отметить, что понижается гигроскопичность гранул и повышается их прочность, тем самым снижается вероятность разрушения при заливке, что повышает качество получаемых изделий из вспененного алюминия.

В работе [17] описывается устройство, которое имеет вид бескаркасной неразъемной детали, состоящей из рабочей части (пористый цветной металл) и узла крепления (цветной металл). Рабочая часть выполнена методом литья в условиях создания разницы давления в литейную форму части металлического сплава. Литейная форма предварительно разогрета до температуры заливаемого сплава и содержит слой порообразователя, высота которого соответствует высоте рабочей части. Цельнометаллическая часть выполнена литьем остальной части металлического расплава в эту же форму, однако, на высоту узла крепления. В ходе кристаллизации формируется неразъемное соединение, а пористость образуется удалением порообразующего наполнителя после охлаждения отливки.

Способ получения включает в себя следующие операции. Сперва производят предварительный подогрев порообразующего наполнителя до температуры, не превышающей температуру плавления металла. В качестве наполнителя используют водорастворимые соли: хлориды, карбонаты, сульфаты или фосфаты щелочных или щелочноземельных металлов, с размером частиц 0,01–5,0 мм. Далее порообразователь помещают в литейную форму на высоту, соответствующую высоте пористой части изделия, слой формируют уплотнителем. Заливка предварительно расплавленного цветного металла или его сплава происходит в условиях создания разницы давления от 0,2 атм., количество которого обеспечивает пропитку порообразователя и формирование прибыльной и цельнометаллической части с последующей кристаллизацией в литейной форме. Затем отливку подвергают механической обработке для придания геометрических форм и удаления цельнометаллической пленки с пористой части. После порообразующее вещество удаляют вымыванием или выпариванием (иногда обе операции идут последовательно). Полученную заготовку сушат и, в заключение, из цельнометаллической части формируют резьбовой или фланцевый узел крепления методом механической обработки [17].

Область применения описываемого метода получения устройства варьируется в разных направлениях: для фильтрации топлива и масел; для аэрации воды в установках очистки, бассейнах; для фильтрации и регенерации масел гидравлических систем; для снижения уровня шума; для установки в системах

очистки и осушки воздуха пневмосистем в конденсатоотводчиках воздушных и паровых систем; в установках очистки горячих технологических газов и жидкостей; в системах пенного пожаротушения и пневмотранспорта для создания псевдожизненного слоя; в качестве фильтрующего элемента в фильтрах глубокой очистки на топливоразделочных колоннах; для фильтрации вязких сплавов, в том числе расплавов полимеров при высоких температурах.



1 – рабочая часть; 2 – цельнометаллическая часть

Рисунок 8 – Схема устройства из пеноалюминия

Достоинствами данного изобретения являются возможность получения изделий любых размеров и формы с высоким ресурсом работы. Также таким способом получают изделия с высокой проницаемостью и пористостью, что обеспечивает высокую производительность целевого изделия. При восстановлении отработанных изделий их остаточная проницаемость позволяет осуществить многократное использование, то есть можно сказать, что ресурс работы получаемых изделий значительно увеличивается.

Также следует отметить, что в устройстве рассматривается новый подход соединения пористой и цельнометаллической части, характеризующейся образованием диффузионного слоя, что, в свою очередь, гарантирует высокую прочность неразъемного соединения. Это способствует расширению технологических возможностей в формировании изделий, содержащих пористую часть с узлом крепления. Важно обратить внимание, что формирование пористой и цельнометаллической части в одно действие с получением цельнолитой отливки обеспечивает высокой проницаемостью пористой части изделия с улучшением устойчивости к механическим воздействиям как пористой части, так и диффузионного соединения.

В итоге можно заключить, что данный метод получения пеноалюминия: дает возможность получить изделия как с метрической и нестандартной резьбой, так и с другими видами крепления; обеспечивает высокой механической прочностью, термостойкостью, грязеемкостью, что способствует расширению области применения и увеличению сроков работы деталей [17].

Известен способ получения пеноалюминия [18], в котором водорастворимую соль с размером фракции 0,64–0,32 мм нагревают в печи и пересыпают в предварительно разогретый кокиль, донная часть которого соединена с источником вакуума. Поверх этого слоя насыпают наполнитель того же состава, но с более мелкой фракцией 0,32–0,16 мм. Далее на поверхность наполнителя разливают расплав алюминия. Пропитка алюминия осуществляется в условиях вакуума. После затвердевания отливки удаляют участок механической обработкой, который был заполнен мелкодисперсным наполнителем. Остальную часть с большим размером водорастворимых солей удаляют растворением в воде. Таким образом обеспечивается равномерное распределение пор в отливке. В результате контроля случаев разноплотности более 2 % не выявлено.

Проанализировав источники по методу получения пеноалюминия с использованием водорастворимых солей можно сделать вывод о том, что получаемые отливки имеют вид открытоячеистого алюминия. Данный вид алюминия, в отличие от закрытоячеистого, имеет более низкие показатели по прочности, что в значительной степени сужает его область применения: теплообменные устройства; огне- и пламяпреградители; фильтры [3].

1.3 Вспенивание с порообразователем

Метод вспенивания с порообразователем проходит в несколько этапов. Сперва в расплав алюминия при температуре 680 °С (выше температуры плавления) вводят кальций, в количестве 1,5 % от общей массы для увеличения вязкости. Далее расплав переливают в форму с одновременным добавлением порофора (порообразователя) при непрерывном перемешивании с помощью вращающейся крыльчатки. Вспенивание дигидрида титана (порообразователя) происходит в течение пятнадцати минут при постоянной температуре, равной 680 °С. Полученную отливку охлаждают с помощью вентиляторов и разрезают на листы требуемой толщины. Данный способ был изобретен в Японии компанией *Shinko Wire Company, Ltd.* и носит название *Alporas*.

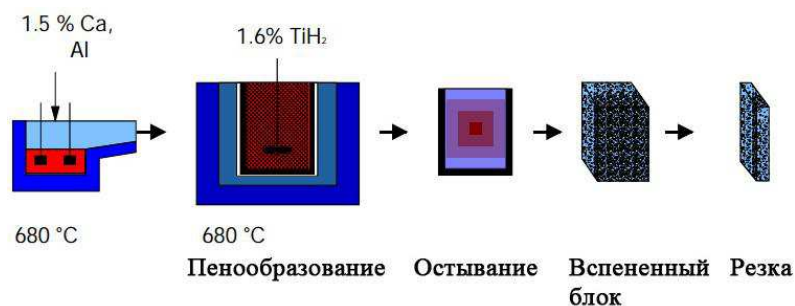


Рисунок 9 – Получение пенистого алюминия методом *Alporas*

Данный способ является достаточно технологичным и выбран нами в качестве эксперимента. Однако данная технология приобретает все большие

модернизации с целью устранения таких недостатков как неконтролируемый размер пор и малая пористость. Изобретение [19] характеризуется тем, что в качестве нововведения используют кристаллизатор (после операции вспенивания) при непрерывном литье. Вытягивание слитка проводят со скоростью, обеспечивающей затвердевание алюминиевого сплава с введенным пороффором до начала его активного разложения. Затем слиток подвергают горячей деформации для формирования плотной заготовки с конфигурацией готового изделия. Операцию вспенивания осуществляют при последующей высокотемпературной термообработке прокатанных листов.

Благодаря тому, что существует возможность получения невспененного слитка, то подобно слиткам из деформируемых алюминиевых сплавов осуществляется возможность получения плотных заготовок требуемой конфигурации и последующего вспенивания с получением разнообразной номенклатуры изделий из пеноалюминия (например, лист, плита, профиль, труба, штамповка) с различными размерами и массой.

Особенностью является то, что подбирают такой алюминиевый сплав, в котором присутствует широкий интервал кристаллизации, и также было осуществлено армирование частицами тугоплавких соединений, инертных по отношению к расплаву матричного состава и нерастворимых в воде. Выбор пороффора осуществляют в пользу способности активно разлагаться с выделением газа при температуре выше солидус алюминиевого сплава [19].

Если заготовка из алюминиевого сплава содержит только пороффор, то термообработку ведут в интервале солидус-ликвидус. Если же она содержит и порообразователь, и тугоплавкие соединения, то термообработку проводят при температуре ниже линии ликвидус.

Можно заключить, что данный способ не только позволяет расширить номенклатуру получаемых изделий из пеноалюминия, но и повысить эксплуатационные свойства, такие как износостойкость и жесткость, в 1,5–3 раза. Однако присутствие тугоплавких частиц затрудняет их механическую обработку, в связи с чем разработан другой способ получения вспененного алюминия.

Способ [20] отличается тем, что вначале приготавливают сплав определенного состава: Mg – 5–6 %; Zn – 20–40 %; Cu – 4–6 %; Al – остальное. Главным преимуществом данного сплава является возможность получения качественного плотного слитка из пеноалюминия, благодаря предотвращению вспенивания расплава до затвердевания слитка, так как температура ликвидус данного сплава составляет 530 °С, что позволяет деформировать слиток под давлением.

Метод включает в себя использование следующих действий. В предварительно разогретую печь помещают алюминий и магний, в количестве 50 % от требуемого содержания, интенсивно перемешивают и выдерживают в печи, в течение 8–10 мин. Далее в расплав вводили по расчету медь, цинк и оставшийся магний. После введения легирующих элементов, расплав переливали в литейный миксер и при температуре приблизительно 600 °С разливали методом непрерывного литья в кристаллизатор скольжения. При этом одно-

временно вводили порофор, дигидрид титана, в жидкую лунку сплава в кристаллизаторе при непрерывном перемешивании, используя вращающуюся механическую мешалку. Таким образом получили слиток равномерно распределенных частиц порообразователя, причем его содержание составляет приблизительно 1 %. Далее слиток прессовали на полосу, которую обрабатывали давлением в лист, толщиной 3 мм, который в дальнейшем разрезали на мерные заготовки. Заключительной операцией является термообработка при температуре электропечи 700 °С. В результате, получены относительно однородные образцы пеноалюминия с удельным весом 0,5 г/см³ и коэффициентом вспенивания, равным 6 [20].

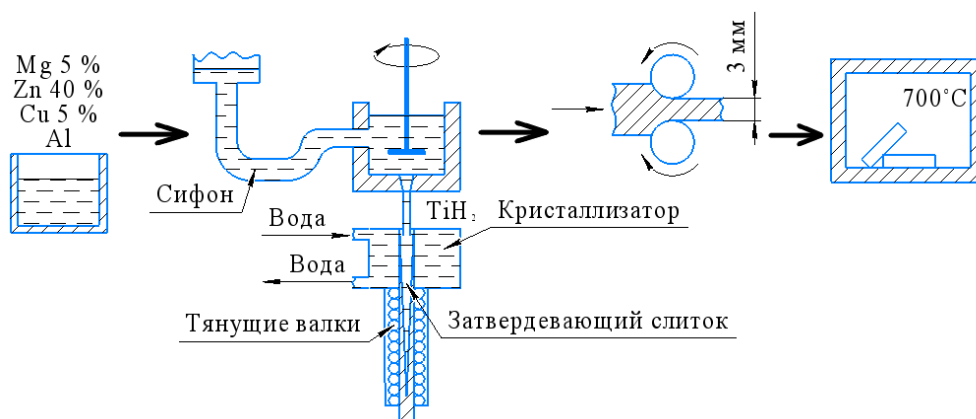


Рисунок 10 – Способ получения пеноалюминия из сплава Al–Zn–Cu–Mg

Достоинством выбора данного сплава для получения вспененного алюминия является его температурный интервал кристаллизации – 500–530 °С. Поскольку активная реакция при введении в него порофора при непрерывном литье не происходит, так как температура активного разложения гидроксида титана составляет 550–650 °С. Это гарантирует получение невспененного слитка, который становится пригодным для получения деформированных полуфабрикатов и качественного пеноалюминия, который характеризуется высоким коэффициентом вспенивания и однородностью порового пространства [20].

Однако использование в качестве порообразователя гидроксида титана выявляет существенный недостаток – недостаточность термической стабильности, которая является причиной преждевременной потери газа в процессе введения порошка в расплавленный металл. Решение этой проблеме предлагается в работах [21–23] путем окисления порофора, благодаря чему подавляется процесс преждевременного разложения гидроксида титана, вследствие чего образуется вспененный алюминий с различной структурой пор.

Здесь следует отметить, что наилучшие результаты окисления наблюдаются при температуре 440 °С в течение часа [21; 22]. Заметное же увеличение удельного содержания гидроксида после термической обработки наблюдается, если повысить температуру окисления выше 500 °С. А также стоит обратить внимание на то, что потери водорода значительно возрастают в процессе

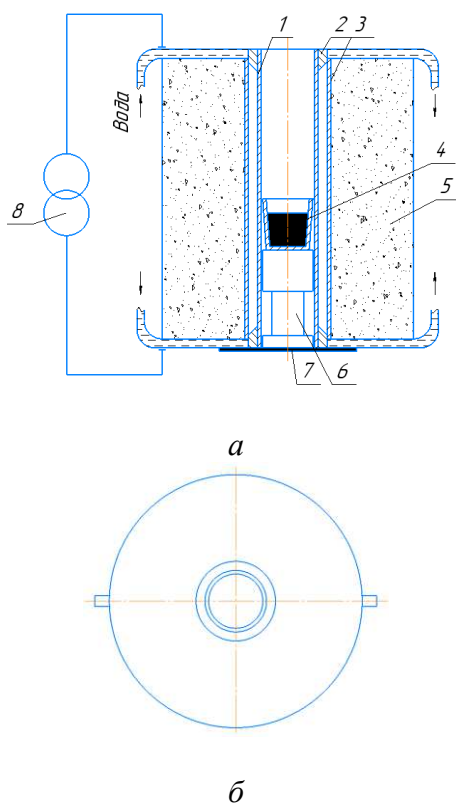
окисления также по причине увеличения времени прогрева при одной и той же температуре с одного до трех часов.

Стоит обратить внимание на способ получения вспененного алюминия [23], в котором применяется технология распыления. В этом случае порофор вводят с предварительно подготовленным вспомогательным сплавом в виде порофорсодержащих частиц. Вспомогательный сплав готовят из двух и более основных компонентов металлического базового состава, задачей которого является уменьшить температуру плавления ниже 550 °С (температура начала активного разложения порообразователя). Сам механизм получения пеноалюминия основывается на операциях: изготовлении металлического базового сплава; введении вспомогательного сплава, содержащего вспенивающее вещество; дальнейшее распыление расплава и охлаждение полученных частиц полуфабриката.

Опираясь на вышеперечисленные данные, в качестве эксперимента был выбран метод «вспенивание с порообразователем», поскольку представляет наибольшие перспективы для получения пеноалюминия в лабораторных и промышленных условиях.

2 Методы изготовления образцов и их исследования

Опыт проводился с использованием *электрической плавильной печи Таммана*. В печах сопротивления косвенного нагрева электрический ток протекает по нагревательным элементам, выделяя из них теплоту, передающуюся нагреваемым изделиям теплопроводностью, конвекцией, излучением. Они обеспечивают температуру при высокой точности и равномерности нагрева, также просты в эксплуатации.



6

- 1 – графитовая нагревательная трубка; 2 – контактные полукольца; 3 – экран;
4 – тигель с металлом; 5 – теплоизоляционная засыпка; 6 – графитовая подставка;
7 – нижняя крышка; 8 – трансформатор

Рисунок 11 – Плавильная печь сопротивления Таммана:
а – схема печи; б – вид сверху; в – общий вид

Данную печь следует отнести к высокотемпературной, поскольку она способна работать при температурах выше 1250 °С, что является достаточным параметром для приготовления не только алюминиевых сплавов, но и медных. В нашей работе достаточным пределом является 700 °С. Здесь же можно отметить недостаток печи, который заключается в трудности поддерживать температуру постоянной, то есть она всегда стремится к нагреву, поэтому выдержка образцов в печи не должна превышать 15–20 минут.

В качестве нагревательного элемента применяют водоохлаждаемую графитовую трубу. Тигель с металлом помещается на графитовую подставку,

путем ее вертикального перемещения. В целях безопасности печь снабжена экраном и теплоизоляционной засыпкой.

Поскольку материалы, применяемые в высокотемпературных нагревателей обладают большим температурным коэффициентом электрического сопротивления и заметно подвергаются старению, что отрицательно сказывается на работе печи. Поэтому необходимо использовать понижающие трансформаторы с широким диапазоном изменения вторичного напряжения, вид которого представлен на рисунке 11.

В плавильной печи периодического действия изделия загружаются в рабочее пространство и нагреваются в нем, не перемещаясь. Они маневреннее и универсальнее, чем печи непрерывного действия, допуская быстрый переход от одного технологического процесса к другому. Преимущественно данную печь применяют при производстве разнообразных изделий, экспериментальном и индивидуальном, также во вспомогательных цехах (инструментальные, ремонтные) при эпизодической загрузке [24].

Показания температуры в различных точках рабочего пространства в каждый момент времени одинаковы или имеют определенное значение, но могут изменяться со временем (как было указано выше). Это благоприятно применять там, где присутствует большое количество разнородных деталей, требующих

К недостаткам электропечи сопротивления относят: трудность получения высоких температур (более 1200 °С), поскольку высокотемпературные печи имеют малый ресурс; нагрев только с поверхности изделий – это увеличивает время нагрева образца; затруднение с ремонтом (охлаждение и последующий разогрев требуют много времени и электроэнергии); слабая концентрация мощности, что утяжеляет конструкцию и делает электропечь малопродуктивной [24].

В качестве оснастки использовались шамотно-графитовый и керамический тигли. В роли вспомогательного оборудования выступали металлические клещи.

В состав *шамотно-графитового тигля* входят: графит, шамот и пластическая огнеупорная глина. Из данного материала изготавливают желоба для транспортировки расплавленного чугуна, стаканы для непрерывной разливки стали, тигли для плавки сталей и различных цветных металлов, пробки для стопорных устройств при разливке сталей, обладающих наибольшей агрессивностью [25].

Состав шамотно-графитовых шихт не одинаков для тиглей, стаканов и пробок. В тиглях, для предотвращения сгорания и окисления графита, используют мягкий графит с размерами чешуек 0,2–1,2 мм. Что касается шамота, то он должен быть плотным, безусадочным и огнеупорным. Связкой выступает высокопластичная, тонкодисперсная глина с температурой спекания 1150–1250 °С. Основное ее достоинство в том, что она позволяет получить высокопластичную массу, в которой графит защищен от окисления [25].

Способ получения описываемого тигля включает в себя несколько операций. Сперва компоненты шихты в виде порошка дозируют по массе и перемешивают. Затем увлажняют и вновь перемешивают, после чего обрабатывают полученную смесь на ленточном прессе. Далее ее выдерживают в специальных камерах в течение 15–20 суток с целью повышения пластичности. После вылежавшуюся массу пропускают через ленточный пресс 2–3 раза, имеющего определенную форму мундштука, благодаря которому обеспечивается получение заготовок нужной конфигурации. Заключительной операцией является формовка изделий путем допрессовки полученных заготовок.

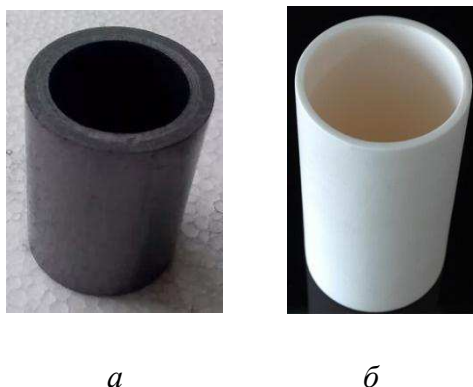


Рисунок 12 – Оснастка: *a* – шамотно-графитовый тигель;
б – керамический тигель

Стоит обратить внимание и на составную часть шамотно-графитового тигля – графит. *Графитовые тигли* отличаются тем, что они пригодны для большинства металлов, так как не образуют карбидные соединения. Графитовый тигель может быть в форме стержней и труб различных диаметров, что благоприятно сказывается в работе с печью периодического действия, когда требуется быстрая смена оборудования под различный объем металлического сплава. Если такой тигель снабжен крышкой, то существует возможность самопроизвольного присутствия восстановительной атмосферы, не смотря на небольшой доступ количества воздуха. Теплопроводность чистого графита меньше, чем стали, но, тем не менее значительно больше, чем у большинства огнеупорных окислов или силикатов. Также к достоинствам графитового тигля стоит добавить высокий срок эксплуатации и относительно недорогую стоимость в отличие от керамических.

Основным компонентом *керамический тиглей* является оксид алюминия. Они обладают рядом преимуществ: высокая термоустойчивость (около 2000 °С), химическая инертность, хорошая теплопроводность, минимальный уровень пористости, диэлектрические качества. Сочетание высокой огнеупорности и химической стойкости позволяют применять данный материал в различных вариантах лабораторных исследований – плавки металла и сложных химических соединений, прокаливания и высокотемпературного синтеза.

Основным недостатком керамического тигля является быстрый выход из строя, поскольку керамика сильно подвержена истиранию и при воздействии высоких температур портится намного быстрее.

В качестве пробоподготовки использовалось оборудование фирмы *Struers – Tegrapol–15*. Шлифовально-полировальный станок обладает переменной скоростью 40–600 об/мин с шагом 10 об/мин. Диаметр диска составляет 200 мм. Мощность двигателя – 370 Вт. Оборудование имеет распределительный ящик с электрической частью и управлением для установки шкафа.



Рисунок 13 – Шлифовально-полировальный станок *Tegrapol–15*

Дополнительно станок оснащен оборудованием *TegraForce–1*. Установка позволяет обрабатывать образец автоматически с переменной скоростью 50–150 об/мин с шагом 10 об/мин. Устройство способно получать образцы тонкой толщины и полировать от одного до трех заготовок, зафиксированных в держателе. Для более качественной обработки оборудование оснащено трубкой для сжатого воздуха, длиной 8,0 м.



Рисунок 14 – Держатель образцов *TegraForce–1*

Достоинствами данного оборудования являются легкая установка образцов в держатель, надежность, простота в использовании, дистанционное управление, возможность обработки радиационно-стойких материалов, минимальные радиоактивные отходы.

Микроструктуры образцов рассматривались с помощью сканирующего электронного микроскопа *HITACHI S5500*. Он использует технологию *in-lines* с целью получения не только сверхвысокого разрешения, но и высокой чувствительности анализа энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (*EDS*).



Рисунок 15 – Сканирующий электронный микроскоп *HITACHI S5500*

Работа электронной пушки характеризуется полевой эмиссией с холодным катодом. Ускоряющее напряжение возможно регулировать в пределах 530 кВ. Оборудование имеет два режима разрешения: 0,4 нм при 30 кВ (высота образца 1 мм) и 1,6 нм при 1 кВ. Микроскоп оборудован спектрометром *EDS*, что позволяет проводить картирование и рентгено-флуоресцентный анализ.

Здесь используется система сфокусированного ионного пучка *FB-2100* для прецизионной и быстрой подготовки образцов для сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

К благоприятным характеристикам можно отнести возможность травления и резки образца с микрометровой точностью. Благодаря присутствию ионов галлия скорость травления увеличивается в 4 раза по сравнению с существующими аналогами. Следует отметить, что сканирующий ионный микроскоп обладает разрешением, равным 6 нм. Также осуществляется возможность осаждения ионов углерода и вольфрама. В оборудование включены: система для отбора микропроб из образца, а также держатель для образцов.

3 Экспериментальная часть

В ходе работы было проведено два эксперимента. Технология *первого* эксперимента была основана на методе *Alporas*. В качестве вспенивающего элемента выбран дигидрид титана TiH_2 . В этом случае алюминий приобретает пористую структуру, благодаря протекающей реакции:



то есть выделившийся водород и является причиной уменьшения плотности алюминия.

Эксперимент проводился с использованием следующих действий. В предварительно разогретую печь, с силой тока 120 А, погружают шамотно-графитовый тигель, в котором находится технический алюминий в количестве 193 г. Процесс плавления приблизительно составляет 30 мин. После тигель вынимают из печи и, удалив оксидную пленку, внедряют кальций. Далее перемешивают, используя графитовый стержень, в течение 6 мин. После, также удалив оксидную пленку, погружают гидрид титана. Перемешав в течение 1–2 мин полученную смесь, тигель закрывают крышкой и выдерживают в течение 3–5 мин. По истечении срока снимают оксидную пленку и разливают данный расплав в кокиль. Ниже представлена таблица последовательных операций.

Таблица 1 – Экспериментальные данные

Наименование	Материал	Вес, г	Время, мин	Температура, °С	Сила тока, А
Плавление	Al _{техн}	193	30	680	180
Внедрение	Са	3	6	685	220
Внедрение	TiH ₂	3	5	670	220
Литье в кокиль	-	199	-	-	-
Охлаждение	пеноалюминий	160,4	-	24–26	-

Так как для повышения вязкости был добавлен кальций, то сплав обладает плохой жидкотекучестью. После охлаждения масса образца равна 160,4 г.

Измерив объем и рассчитав плотность, можно сделать вывод о том, что плотность образца уменьшилась на 12 %. Структура пеноалюминия является закрытоячейистой и размер ячеек составляет, приблизительно, 0,1-0,5 мм.



Рисунок 16 – Образец пеноалюминия:
a – отливка; *б* – сечение образца со сколом

Поскольку температурный интервал активного разложения TiH_2 составляет 550–650 °С [20], то при его введении в расплав при температуре 670–700 °С произошла бурная реакция (1). Это свидетельствует о том, что большая часть водорода ушла в атмосферу. Основной причиной можно считать невозможность постоянно поддерживать температуру при 660–670 °С. Вследствие чего размер пор не достиг желаемых результатов и структура образца оказалась неоднородной.

Недостатком данного метода является малая пористость. Поэтому для решения поставленной задачи был предложен способ, описываемой в работе [20].

Данный патент выбран в основу *второго* эксперимента. Сперва в расплав технического алюминия АД31 вводили магний, в количестве 50 % от требуемого состава, т.е. 8 г. Затем перемешивали в течение 5 минут и выдерживали в печи при температуре 650 °С. Далее вводили по расчету медь (15 г), цинк (106,4 г) и оставшийся магний (7 г). Медь внедряли в первую очередь, поскольку процесс плавления из перечисленных элементов является самым долгим. Цинк добавлялся в виде гранул, что значительно ускоряло процесс плавки, поэтому его использовали в завершении данных элементов. Далее также перемешивали, выдерживали в печи в течение 5 минут и нагревали печь до температуры 700 °С. После, удалив шлак, полученный сплав переливали в шамотно-графитовый тигель и охлаждали до температуры 550 °С. При этой температуре внедряли порообразователь – дигидрид титана TiH_2 – при непрерывном перемешивании в количестве 1,2 % от общей массы (3,2 г). Далее полученную смесь переливали в водоохлаждаемый кокиль.

В ходе эксперимента было проведено 2 плавки с одинаковым составом. Один из образцов подвергся деформации (прокатке) до толщины 3 мм. Заключительным этапом является термическая обработка, проводимая при температуре 700 °С для формирования в структуре заготовки заданной пористости.

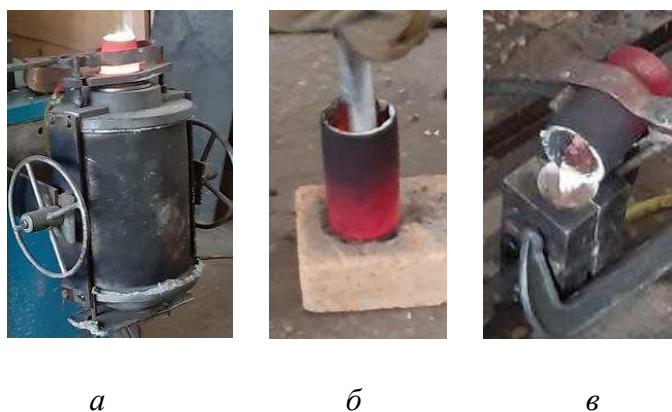


Рисунок 17 – Последовательность получения пеноалюминия:
a – извлечение; *б* – внедрение, перемешивание;
в – разлив металла в водоохлаждаемый кокиль

Главным преимуществом выбранной технологии является температурный интервал кристаллизации алюминиевого сплава – 500–530 °С. То есть порошок TiH_2 , внедряемый в сплав распределен равномерно и вспенивание происходит уже после термической обработки, в котором большая часть водорода находится в отливке. По этой причине повышается однородность порового пространства, увеличивается коэффициент вспенивания и удельный вес уменьшается приблизительно на 30 %.

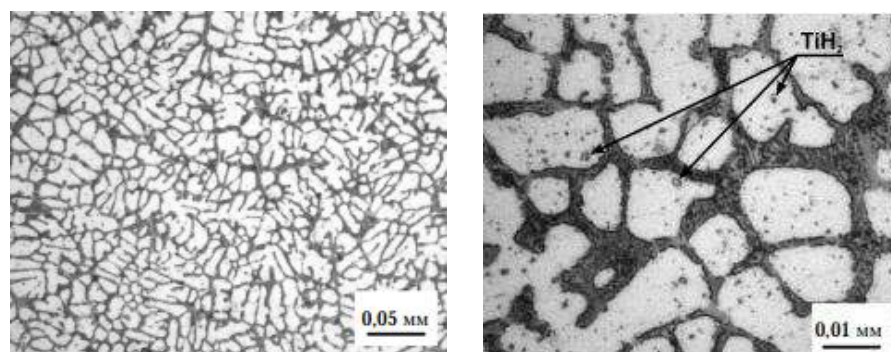


Рисунок 18 – Микроструктуры образцов, содержащих частицы дигидрида титана

Поскольку в патенте не описано условие обработки отливок пластической деформации, то первый образец был поделен на две части. Первая часть подвергалась холодной деформации (второй образец), вторая – горячей при температуре 350 °С (первый, третий и четвертый образцы). В обоих случаях получить образец толщиной 3 мм не удалось, поскольку в состав входит цинк, что подвергает материал меньшей пластичности и большей хрупкости. Однако при горячей обработке отливка подверглась разрушению меньше, чем при холодной.

Еще одним затруднением при работе было отсутствие в источнике времени выдержки прокатанных образцов в печи. Поэтому было проведено не-

сколько экспериментов с разными условиями выдержки и напряжением в интервале температур 700–750 °С. Ниже представлены данные термической обработки эксперимента.

Таблица 2 – Данные термообработки прокатанных образцов

Номер образца	Сила тока, А	Время выдержки, мин	Температура, °С
1	160	5-7	700–750
2	120	6	
3	140	3	
4	140	25	

Первый и второй образцы не имели формы, поэтому сплав, растекаясь по поверхности, не имел пор видимого размера. Третий образец выдерживался в печи 3 минуты, в результате чего процесс активного выделения водорода из порофора не произошел и процесс плавления не наблюдался.

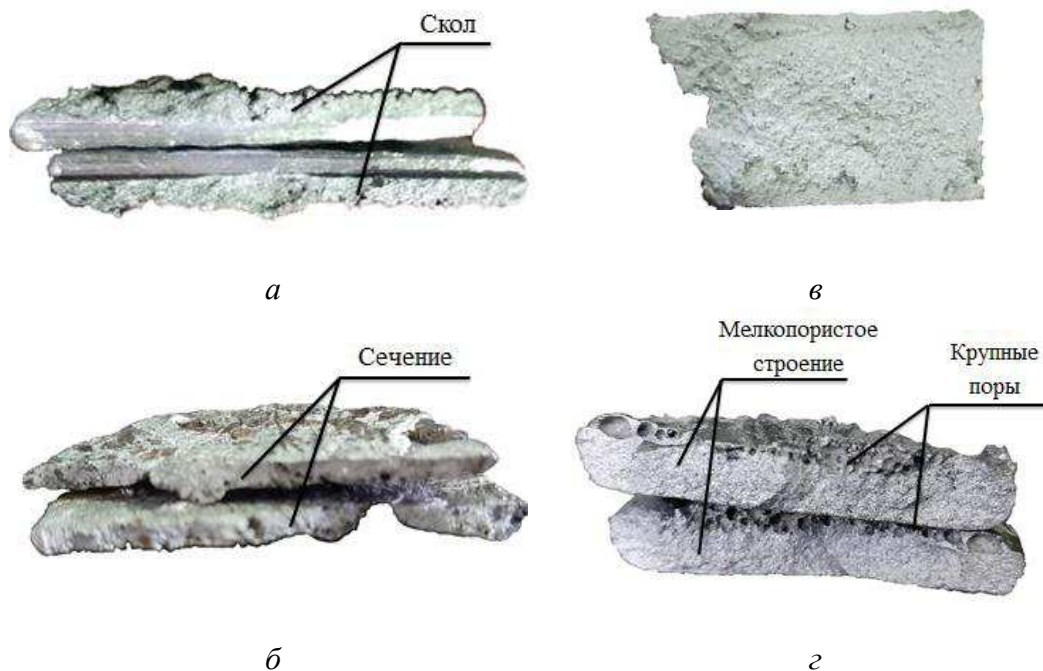


Рисунок 19 – Результаты эксперимента после термообработки:
а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4

Четвертый образец подвергся термической обработке в керамическом (корундовом) тигле. Сперва производился нагрев до плавления в течение 15 минут, затем заготовка выдерживалась в печи в течение 10 минут. Процесс происходил в интервале температур 700–750 °С. Далее образец охлаждался вместе с тиглем на воздухе, тем самым обеспечивая процесс порообразования в форме.

В верхней части сечения образца обнаружены крупные поры, что свидетельствует о присутствии мелкопористых ячеек. В результате движения га-

за поры собираясь и сливаясь вместе укрупнялись в размере, а оксидная алюминиевая пленка была препятствием к выходу выделившегося водорода. Мелкоячеистое строение пеноалюминия благоприятно сказывается на механических свойствах. Так как сечение пор обладает приблизительно одинаковым размером, то можно сделать вывод, что изделия изготовленные данным образом будут обладать изотропностью. Это значительно повышает шансы в производстве для получения деталей из пеноалюминия обладающих одинаковыми механическими свойствами.

Исследования показывают, что полученные образцы имеют анизотропную структуру: нижняя часть отливки обладает размером пор микроскопического размера, верхняя часть – крупными. Это связано с тем, что в процессе нагрева до температуры 500–600 °С происходит непрерывный процесс разложения дигидрида титана и часть водорода удаляется из расплава в атмосферу. Из литературы [21, 22] следует, что температура разложения TiH_2 начинается с 300 °С, а также обнаруживается пик выделения водорода при 500–600 °С. При этих температурах сплав находится в жидком состоянии. Поэтому часть водорода уходит в окружающую среду, а часть укрупняется и задерживается в оксидной пленке. Поэтому для получения изотропной структуры готового изделия необходимо замедлить процесс разложения дигидрида титана. Для этого предлагается получение на поверхности частиц TiH_2 защитной пленки, которая бы снизила начало разложения порообразователя.

В настоящее время имеются несколько вариантов создания условия для замедления начала разложения TiH_2 . Первый способ заключается в окислении дигидрида титана на воздухе (о чем отмечено выше); второй – напыление никеля на поверхность частиц TiH_2 . В работе планируется и другие более дешевые способы для предотвращения выделения водорода из указанного поробразующего порошка. Эти способы будут исследованы в последующей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пористые алюминиевые отливки способны конкурировать с изделиями других материалов благодаря: возможности сочетания в одном изделии пористой и монолитной части; возможности получения изделий значительных размеров и любой конфигурации со значительно меньшей себестоимостью; лучших механических свойств при одинаковом гидравлическом сопротивлении; большей грязеемкости; большей фильтрационной способности при одинаковом гидравлическом сопротивлении; низкого удельного веса.

Пористый литой алюминий востребован промышленностью благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. Технология пропитки расплавом водорастворимого наполнителя в настоящее время единственная позволяет получать широкий спектр пористых алюминиевых изделий – от демпферов до фильтроэлементов, любых размеров и конфигурации, сочетающих в одном изделии пористую и монолитную часть.

Благодаря своему легкому весу алюминиевая пена может стать очень важным конструкционным материалом для аэрокосмической и автомобильной промышленности. Ведь если вес конструкции уменьшается, то становится меньше и расход топлива, что позитивно влияет с экономической точки зрения. Демпфирующая способность способна стать важной частью в случае замены некоторых деталей в автомобиле, что гарантирует не только безопасность пассажира, но и дает возможность сократить количество деталей, что также влияет на уменьшение веса и расход топлива.

Еще одним важным преимуществом является изотропность свойств и отсутствие какого-либо клеевого соединения. Последнее могло бы помочь сохранить целостность конструкции в случае пожара.

Алюминиевая пена может также служить в качестве материала для изготовления теплообменников, носителей для катализаторов, тепловых экранов или фильтров. Другой возможностью является использование в качестве материала для защиты от электромагнитных волн для стен и потолков помещений с электронным оборудованием.

В строительстве сооружений и зданий есть хорошие возможности для применения алюминиевой пены, в основном из-за ее хорошего сопротивления проникновению огня и теплоизоляционным свойствам. Звукоизоляционные свойства позволяют изготавливать из пеноалюминия облицовки в железнодорожных тоннелях под мостами, шоссе или внутри зданий в качестве звукопоглощающего материала.

Необычный вид и уникальные свойства алюминиевой пены имеют большой потенциал для дизайнеров бытовых предметов и мебели. Этот материал может быть использован для изготовления абажуров, стоек различного назначения и стеновые панели. Из вспененного алюминия в 2012 году были изготовлены стенды для выставки *Baselworld*. Дизайнеры, придавая форму пористому литому алюминию, смогли отметить, что он легче поддается обработке, чем пенометалл, полученный порошковой технологией [26].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Финкельштейн, А.Б. Теория и практика получения пористых отливок из алюминиевых сплавов пропиткой: автореф. дис. ...доктора технических наук: 05.16.04 / Финкельштейн Аркадий Борисович. – Екатеринбург, 2010.– 40 с.
- 2 Крушенко, Г.Г. Технологии и механизм формирования пенометаллов и их применение в летательных аппаратах II / Г.Г. Крушенко // Вестник Сиб-ГАУ им. М. Ф. Решетнева. – 2014. – №1. – С. 154–160.
- 3 Зимеров, В.А. Пеноалюминий: получение, области применения / В.А. Земиров, С.В. Власов, П.О. Суходаев // Сборник трудов конференции. – Красноярск, 2014. – С. 551–554.
- 4 Воронин, С.В. Способы получения пористых материалов на основе алюминия / С.В. Воронин, П.С. Лобода // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 1068–1074.
- 5 MetFoam 2019: 11th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams [Электронные ресурсы]: // The Minerals, Metals and Materials Society. – 2018. – Режим доступа: https://www.tms.org/portalMEETINGS-__EVENTS/TMS_Meetings__Events/Upcoming_TMS_Meetings/MetFoam2019/portal/Meetings__Events/2019/MetFoam2019/default.aspx?hkey=4d487f9d-5efc-4456-9fc8-4240012095a6.
- 6 Ардамин, В.А. Технологии получения и применение пенометаллов / В.А. Ардамин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. – С. 111–112.
- 7 Гусаров, А.П. Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А. Марков [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение. – 2009. – №1. – С. 58–66.
- 8 Калиниченко, В.А. Способы получения вспененного алюминия, области его применения и ряд особенностей механической обработки / В. А. Калиниченко, А. С. Калиниченко // Литье и металлургия. – 2005. – № 2. – С. 164–169.
- 9 Пат. 2016113 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/08. Способ получения вспененного металла / В.Н. Буньков, Е.Ю. Решетников, В.В. Глызин, С.В. Ливанцов ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество закрытого типа – Товарищество с ограниченной ответственностью "Регул-бизнес" Лтд. ; заявл. 20.05.92 ; опубл. 15.07.94.
- 10 Пат. 2026394 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/08, С 22 В 21/00. Способ получения вспененного алюминия / В.Н. Буньков, Е.Ю. Решетников, В.П. Булгаков ; заявитель и патентообладатель Научно-внедренческое, проектно-конструкторское и посредническое предприятие «СИБ-индекс» ; заявл. 25.08.92 ; опубл.09.01.95.
- 11 Пат. 2046151 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/08. Способ получения пенометалла / В.Р. Вольфганг, Б. Киркеваг ; заявитель и патентообладатель Норск Хюдро А.С. ; заявл. 11.07.90 ; опубл. 20.10.95.
- 12 Пат. 2068455 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/08, С 22 В 21/00. Способ получения пеноалюминия / В.Н. Буньков, Е.Ю. Решетников, С.В. Ливанцов, В.В. Глызин ; заявитель и патентообладатель Сибирский научно-

исследовательский, конструкторский и проектный институт алюминиевой и электродной промышленности ; заявл. 20.05.92 ; опубл. 27.10.96.

13 Пат. 2281980 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/08, Н 05 В 6/00. Способ получения пористого металлического тела / Х. Накадзима ; заявитель и патентообладатель Хидео Накадзима ; заявл. 26.08.02 ; опубл. 20.08.06.

14 Пат. 2400552 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/08, С 22 В 21/00, В 22 D 21/04. Способ получения пеноалюминия / А.И. Ковтунов, Т.В. Чермашенцева, Д.А. Семистенов, В.П. Сидоров ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Средневожжский сертификационно-диагностический центр "Дельта" ; заявл. 26.11.08 ; опубл. 27.09.10.

15 Пат. 2492257 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/08. Способ формирования пеноалюминия / А.И. Ковтунов, Ю.Ю. Хохлов ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тольяттинский государственный университет" ; заявл. 20.02.12 ; опубл. 10.09.13.

16 Пат. 2455378 Российская федерация, МПК С 22 С 1/08, С 22 С 21/00. Способ получения пеноалюминия / Ю.Ю. Хохлов, А.И. Ковтунов, Д.А. Семистенов ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тольяттинский государственный университет" ; заявл. 14.04.11 ; опубл. 10.07.12.

17 Пат. 2200074 Российская Федерация, МПК В 22 D 25/00. Пористое изделие с цельнометаллической частью и способ его получения / Л.Е. Черный, М.Л. Черный, Н.Л. Черный ; заявители и патентообладатели Черный Лев Емельянович, Черный Максим Львович, Черный Никита Львович ; заявл. 30.07.01 ; опубл. 10.03.03.

18 Пат. 2256530 Российская Федерация, МПК В 22 D 25/00. Способ получения пористых отливок / Е.Л. Фурман, А.Б. Финкельштейн, И.Е. Фурман ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный технический университет-УПИ" ; заявл. 08.01.04 ; опубл. 20.07.05.

19 Пат. 2180361 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/08, В 22 D 11/04, В 22 D 21/04. Способ получения изделий из пеноалюминия / В.С. Романова, И.С. Польшкин, А.М. Пономаренко, В.В. Яковенко, М.Б. Новикова, С.Г. Вачьянц, В.К. Король ; заявитель и патентообладатель Польшкин Игорь Степанович ; заявл. 20.07.99 ; опубл. 10.03.02.

20 Пат. 2233346 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/10, С 22 С 1/08, С 22 F 1/053, В 22 D 11/04. Алюминиевый сплав для получения пеноалюминия и способ получения пеноалюминия из него / А.М. Пономаренко, И.С. Польшкин, В.С. Романова, М.Б. Новикова, Е.М. Трубкина, А.М. Бисьев ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Всероссийский институт легких сплавов" ; заявл. 22.04.03 ; опубл. 27.07.04.

21 Анфилов, Н.В. Применение гидридов металлов в качестве порообразователей при получении металлических пен / Н.В. Анфилов [и др.] // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2016. – Ч.2, № 21. – С. 226–233.

22 Царев, М.В. Исследование процесса окисления порошка гидроксида титана методом измерения его электрического сопротивления / М.В. Царев, В.В. Мокрушин, А.В. Стеньгач [и др.] // Журнал физической химии. – 2010. – Т. 84, № 4. – С. 767–772.

23 Пат. 2312913 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/08, В 22 F 9/08. Способ получения полуфабриката для изготовления пенометалла / П.Г. Бережко, А.И. Тарасова, А.А. Кузнецов, Н.В. Анфилов ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" – ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ" ; заявл. 13.03.06 ; опубл. 20.12.07.

24 Чередниченко, В.С. Электрические печи сопротивления. Конструкции и эксплуатация электропечей сопротивления / В.С. Чередниченко, А.С. Бородачев, В.Д. Артемьев. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 572 с.

25 Архитектурная энциклопедия [Электронный ресурс] : многопредмет. журн. – Электрон. журн. – 2011. – Режим доступа: <https://arxi-pedia.ru/teploizolyacionnye-i-ogneupornye-materialy/grafitohamotnyeoagneupornye-izdeliya.html>.

26 Финкельштейн, А.Б. Применение пористого литого алюминия в дизайне / А.Б. Финкельштейн, М.Л. Черный // Инновации в материаловедении и металлургии. – Екатеринбург, 2012. – Ч.2. – С. 156–158.

Федеральное государственное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Материаловедения и технологий обработки материалов
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 
подпись инициалы, фамилия

« ___ » _____ 20 __ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

22.03.01.07 Материаловедение и технологии материалов в машиностроении
код и наименование направления

Исследование процесса получения литых заготовок из пеноалюминия
тема

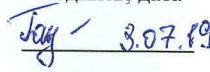
Научный руководитель


подпись, дата

В.Г. Бабкин

инициалы, фамилия

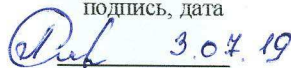
Выпускник


подпись, дата

И.О. Ганюгина

инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата

Л.А. Свечникова

инициалы, фамилия

Красноярск 2019