на правах рукописи

ФИНКЕЛЬШТЕЙН Аркадий Борисович

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРОПИТКОЙ

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

004600562

Екатеринбург – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Замятин Виктор Михайлович

доктор технических наук,
профессор Иоффе Михаил Александрович

доктор технических наук,
профессор Никитин Владимир Иванович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Защита состоится 23 апреля 2010 года в 15^{00} на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 при ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. I (зал ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Ваши отзывы на автореферат диссертации, заверенные печатью организации, в двух экземплярах просим направлять по указанному выше почтовому адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета Д 212.285.05.

Автореферат разослан «25» февраля 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.285.05
доктор технических наук, профессор Карелов С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время экспорт России в основном состоит из сырья и продукции первого передела (в т.ч. металлов), а импортируется высокотехнологичная продукция. Большинство изделий отечественной обрабатывающей промышленности неконкурентоспособно на мировом рынке. При падении цен на сырьевые товары в отечественной экономике неизбежны кризисные явления. Для обеспечения устойчивого развития России необходима структурная перестройка производства с ориентацией на инновационные технологии.

Пористый литой алюминий – высокотехнологичный материал, получаемый методом пропитки наполнителя с последующим его экстрагированием. Отливки из пористого литого алюминия используются в качестве фильтроэлементов, влагомаслоотделителей, активных глушителей шума. Область его применения постоянно расширяется. Пористые алюминиевые отливки успешно конкурируют с изделиями из спеченного металлического порошка за счет:

- возможности получения изделий значительных размеров и любой конфигурации со значительно меньшей себестоимостью;
- возможности сочетания в одном изделии пористой и монолитной части;
- большей грязеемкости;
- большей фильтрационной способности при одинаковом гидравлическом сопротивлении;
- лучших механических свойств при одинаковом гидравлическом сопротивлении;
- низкого удельного веса (пористые порошковые материалы изготавливаются промышленностью из тяжелых металлов).

Технология изготовления пористого литого алюминия разрабатывается на кафедре Литейного производства и упрочняющих технологий УГТУ-УПИ уже более 20 лет. Производство готовых изделий налажено на ООО «Композиционные материалы» и ООО НПП «Металло-химическая компания». Однако ассортимент выпускаемых изделий ограничен, предприятия практически не осваивают новую продукцию. Это следствие невозможности прогнозирования структуры и свойств пористого литого металла. Для внедрения в производственную программу новых изделий требуется проведение экспериментов. Поскольку результат проверки возможности эксплуатации изделия далеко не всегда может быть положителен, а даже при положительном результате отработка технологии требует значительного времени и денег, то предприятия вынуждены отказывать большинству потенциальных заказчиков. Опытные работы проводятся только при перспективе извлечения сверхприбыли, когда альтернативы пористому литому алюминию нет.

Другой проблемой при получении отливок из пористого алюминия является высокий уровень брака. Дефекты пористого металла не подлежат заделке. Коэффициент использования металла находится на крайне низком уровне, по фильтроэлементам не превышая 10%. Возвратное использование пористого алюминия в шихте невыгодно – угар превышает 50%, расплав насыщается пленами.

Сократить время и затраты на освоение новой продукции, снизить долю брака и повысить коэффициент использования металла можно только благодаря исследованию теоретических закономерностей получения пористого литого алюминия, прежде всего композиционной литой заготовки. Композиты в основном используются в качестве легких и прочных конструкционных материалов, что требует высокой адгезии, или даже диффузионного взаимодействия компонентов. Современная теория композитов посвящена в основном именно этим вопросам. Также для конструкционных композитов характерна низкая объемная доля наполнителя (до 20%), что обуславливает схожесть процесса кристаллизации с цельнометаллической отливкой. А краеугольным камнем технологии пористого литого алюминия является отсутствие взаимодействия между компонентами при пропитке - наполнитель играет роль формы для расплава, его объемная доля превышает 50%. Поэтому при разработке технологии получения отливок из пористого алюминия на первый план выходит изучение физико-химических, гидравлических, теплофизических закономерностей формирования композиционной литой заготовки.

Цель работы и задачи исследования

На основе изучения теоретических закономерностей формирования композиционных литых заготовок пропиткой вакуумным всасыванием разработать конкурентоспособную технологию получения изделий из пористого алюминия с заранее заданными свойствами.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Сформулировать основные требования к химическому составу шихтовых материалов для композиционной литой заготовки, обеспечивающему необходимые потребительские свойства готового изделия и минимальные затраты на технологический процесс;
2. На основе исследования физико-химического взаимодействия в системе расплав-наполнитель выявить влияние условий формирования композиционной литой заготовки на ее структуру;
3. Разработать методики прогнозирования эксплуатационных свойств пористого алюминия, на основе которых разработать рекомендации по конструированию готовых изделий;
4. Изучить теплофизические, гидравлические, физико-химические закономерности формирования композиционной литой заготовки;
5. Исследовать закономерности выщелачивания наполнителя из тела композиционной литой заготовки;

6. На основании полученных результатов разработать технологические рекомендации по изготовлению отливок из пористого алюминия.

Научная новизна

1. Обоснованы требования, проведена комплексная физико-химическая аттестация, на основе которой произведен выбор наполнителей и сплавов для изготовления пористого алюминия методом пропитки.
2. Разработана модель структуры пористого литого металла. Выявлена зависимость размера пор от давления пропитки, фракции наполнителя и параметров физико-химического взаимодействия наполнителя и расплава.
3. Экспериментально установлена взаимосвязь между нагрузкой и деформацией оксидной пленки на поверхности расплава, что позволило определить давление, при котором происходит ее разрыв и проникновение расплава в капиллярные зазоры наполнителя.
4. Решена система уравнений, описывающая совместное движение жидкости и газа в пористой среде. Показано, что причиной отклонения от уравнения Дарси на начальном этапе течения является переменное давление на фронте движения расплава. Выявлено, что относительная длина начального этапа течения прямо пропорциональна соотношению вязкости жидкости и газа.
5. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена формула для расчета критической температуры подогрева наполнителя, ниже которой пропитка не идет.
6. Решена задача неизотермической пропитки наполнителя расплавом в объемной модели капилляра. Установлено, что по окончании пропитки в зависимости от температуры расплава и наполнителя, фракции и пористости наполнителя, давления пропитки и размеров отливки градиент температуры расплава может быть либо постоянен, либо формируется 2 зоны: верхняя (у прибыли) с температурой, близкой к температуре заливки расплава и нижняя (донная) с температурой кристаллизации. Решение задачи неизотермической пропитки позволило прогнозировать расположение усадочной раковины в пористой отливке.
7. На основе аппроксимации минимального радиуса пор отверстием в тонкой стенке выведена и экспериментально подтверждена формула для определения коэффициента проницаемости пористого литого металла.

Совокупность результатов выполненного исследования позволила решить научную проблему управления процессом формирования структуры пористых отливок из алюминиевых сплавов, их получения без дефектов.

Практическая ценность работы и реализация ее результатов

1. Разработаны рекомендации по составу сплавов в зависимости от области применения пористых литых изделий. Показано неприемлемое снижение коррозионной стойкости пористого алюминия при использовании в шихте железо- и медьсодержащих ломов

2. Предложены технологические решения для предотвращения формирования следующих дефектов композиционных литых заготовок:
   - неоднородности структуры;
   - газовых раковин;
   - «просечек».
3. Разработан размерный ряд припусков на механическую обработку композиционных литых заготовок на границе с формой и со стержнем.
4. Предложен термический режим пропитки, позволяющий предотвратить формирование усадочных раковин в композиционных литых заготовках.
5. В результате анализа времени выщелачивания наполнителя различными методами рекомендована фильтрация растворителя сквозь тело композиционной литой заготовки по усадочным микрозазорам.
6. Разработаны эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать фильтрационную способность, механические свойства, коэффициент звукопоглощения и демпфирующую способность пористого литого алюминия.
7. Внедрена в производство на ООО НПП «Металло-химическая компания» методика расчета конструктивных размеров и параметров технологии изготовления глушителей шума и фильтроэлементов из пористого алюминиевого сплава.
8. Разработана конструкция глушителя коробчатого типа для высоконагруженных прессов из пористого литого алюминиевого сплава.
9. Разработана методика конструктивного расчета и параметры технологии литья пористого алюминия для изготовления шумопоглощающих щитов и электрохимических фильтров.

В результате внедрения результатов исследования на ООО «Композиционные материалы» получен экономический эффект в размере 1115179 руб в ценах 2005 года.

На защиту выносятся

1. Методика выбора наполнителя и сплава для пористых отливок.
2. Модель формирования пористой структуры в объеме отливки и на ее поверхности.
3. Методика определения силы сцепления частиц вакуумными манжетами в расплаве.
4. Метод расчета скорости течения и давления на фронте расплава.
5. Механизм воздействия гидроудара на структуру композиционной литой заготовки.
6. Методика расчета процесса неизотермического течения расплава в объемной модели капилляра и выявленная схема теплового зонирования композиционных литых заготовок.
7. Определение критической температуры подогрева наполнителя.
8. Модель формирования усадочных раковин и микрозазоров в композиционных литых заготовках.

9. Сравнительная эффективность методов выщелачивания наполнителя из тела композиционной литой заготовки.
10. Технологии получения пористых литых изделий с заранее заданными свойствами: пористостью, удельной поверхностью, коэффициентом проницаемости, тонкостью фильтрации, коэффициентом проскока (при фильтрации), механическими свойствами, демпфирующей способностью, спектральным коэффициентом звукопоглощения.
12. Методики расчета конструктивных размеров и рекомендации по технологии изготовления изделий из пористого алюминия.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций следует из экспериментального подтверждения полученных теоретических закономерностей, использования программ компьютерного моделирования литейных процессов, современных подходов к изучению смачивания и растекания, дифференциально-термического анализа, а также применением современной экспериментальной техники. Основные положения и выводы обоснованы практическим использованием результатов исследования, подтвержденных актами внедрения их в производство.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференции литейщиков России «Совершенствование литейных процессов» (Екатеринбург, 1997), 11 Российской конференции «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов» Екатеринбург-Челябинск, 2004), 6 Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике» (Санкт-Петербург, 2004), 6 международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного, и кузнечно-штамповочного производства» (Барнаул, 2004), всероссийской молодежной научно-технической конференции «Проблемы современного машиностроения» (Уфа, 1994 и 2004), международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2005), 5 международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2008), 4 и 9 съезде литейщиков России (Екатеринбург, 1999 и Уфа, 2009).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 31 печатной работе. Получены 2 патента РФ, один из которых награжден золотой медалью на 3 международном салоне изобретений и новых технологий «Новое время» (Севастополь, 2007).

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, изложена на 338 страницах, включая 132 рисунка, 38 таблиц, список литературы из 259 источников и приложений (программы, акты испытаний, акты внедрения, справки-заключения) на 32 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава содержит сведения о технологиях производства пористых металлов.

Пористые металлы, используемые для фильтрации, в основном изготавливают спеканием. Однако этим способом чрезвычайно трудно получить пористый алюминий, поскольку на его поверхности формируется прочная и тугоплавкая оксидная пленка. Но алюминий является чрезвычайно привлекательным материалом в силу низкого удельного веса, высокой удельной прочности, теплопроводности и коррозионной стойкости. Попытки изготовить пористый алюминий методами порошковой металлургии с использованием растворяющих оксидную пленку флюсов или под высоким давлением предпринимались неоднократно, но получаемые изделия имели либо низкую прочность, либо низкую гидравлическую проницаемость.

Подавляющую часть пористого алюминия получают вспениванием расплава газообразующими гидридами. Пенометаллы имеют неоднородную, труднопрогнозируемую и крупнопористую структуру, что ограничивает их применение конструкционными материалами. Предварительное введение порофора в порошковую металлошихту обеспечивает достаточную однородность структуры – пенометалл по этой технологии используется и в качестве шумопоглощающих щитов. Себестоимость вспененного алюминия настолько низка, что при технологической возможности применения он не имеет конкурентов.

Технология пропитки экстрагируемого наполнителя позволяет получать однородную и прогнозируемую структуру. Широкое промышленное применение получила технология литья пористого алюминия по выжигаемой модели, в качестве которой используется полимерная губка. Изделия, изготовленные по этой технологии, имеют крупнопористую структуру. Только использование в качестве наполнителя водорастворимых солей позволяет формировать структуру пор, благоприятную для фильтрации и конкурировать с пористыми металлами, изготовленными методами порошковой металлургии. В общем виде технология получения пористого металла методом пропитки водорастворимого наполнителя включает следующие стадии:

- Рассев наполнителя по фракциям (монофракция обеспечивает однородность структуры пористой отливки).
- Нагрев наполнителя.
- Засыпка наполнителя в металлическую форму.
- Заливка расплава на поверхность засыпки наполнителя.

- Пропитка наполнителя расплавом (под давлением или вакуумным всасыванием).
- Охлаждение композиционной литой заготовки.
- Механическая обработка композиционной литой заготовки.
- Выщелачивание наполнителя из тела композиционной литой заготовки.

Для получения прогнозируемой структуры порового пространства японскими и швейцарскими исследователями используется предварительное спекание наполнителя в металлической форме, предназначенной и для заливки. Размер пор регулируется временем спекания. Затем наполнитель пропитывается расплавом под высоким давлением. Готовая отливка, таким образом, является точной репликой спеченного каркаса наполнителя. Однако промышленного применения разработанная технология не получила вследствие высокой себестоимости производства.

Предлагаемый вариант технологического процесса не предусматривает спекания наполнителя. Для инициации пропитки используется вакуумное всасывание, что технологично, т.к. заливка расплава производится на поверхность засыпки наполнителя, а вакуумирование производится через венты в днище формы. Структура пористого металла в результате не является точной репликой наполнителя. В месте контакта зерен наполнителя за счет несмачивания его расплавом формируется воздушная манжета. После кристаллизации металла и выщелачивания наполнителя в воде пористая структура характеризуется: максимальным размером пор, который соответствует размеру зерен наполнителя и минимальным размером пор, соответствующим размеру воздушной манжеты. Геометрия воздушной манжеты определяется физико-химическим взаимодействием в зоне контакта расплава и зерен наполнителя.

Вторая глава посвящена исследованию физико-химического взаимодействия расплава и наполнителя.

К порообразующему наполнителю предъявляются требования, определяемые техническими, экономическими и экологическими соображениями:

- температура плавления наполнителя должна быть выше температуры заливки расплава;
- наполнитель не должен смачиваться расплавом матричного металла. В противном случае частицы наполнителя при небольших скоростях пропитки будут со всех сторон окружены расплавом, что сделает удаление наполнителя из тела отливки невозможным.
- наполнитель должен быть химически инертен к металлу, в т.ч. в растворителе; к окислительной среде в процессе подогрева;
- наполнитель должен удаляться из тела отливки в растворителе или любым другим доступным способом. Поскольку наиболее дешевым растворителем является вода, выбор водорастворимых наполнителей очевиден. Оборотной стороной высокой скорости растворения является высокая гигроскопичность. Использование гигроскопичных материалов

значительно увеличивает энергоемкость и сложность технологического процесса;

- *ПДК наполнителя в воде должно быть высоким;*
- стоимость наполнителя не должна быть высока.

Анализ справочных данных позволил выявить класс материалов, удовлетворяющих большинству вышеперечисленных требований (отсутствуют только данные по смачиванию) – ***неорганические соли***, оптимальным набором характеристик из которых обладает NaCl.

Смачивание предлагаемых неорганических солей расплавленными металлами исследовано в вакуумной печи методом верхнего подвода подложки. Для преодоления негативного влияния оксидной пленки, образующейся на поверхности расплава алюминия, эксперимент проводили при остаточном давлении 0,1 Па при постоянной откачке; металл выдерживали при 1100-1150 °С для удаления кислорода в виде газообразного субокисла Al_2O. Были изучены углы смачивания *0* сплавами систем Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, Al-Zn, а также промышленными литейными сплавами подложек из плавленых наполнителей (табл.1). В результате эксперимента было выявлено, что присадка легирующих элементов даже в значительных количествах (10% Mg) не приводит к смачиванию расплавом алюминия изученных наполнителей, что позволяет использовать их при производстве пористого алюминия.

Таблица 1

Углы смачивания расплавами металлов порообразующих наполнителей

Сплав (вес %)	Краевые углы смачивания, °						
	K_3PO_4	Na_3PO_4	Mg_2SO_4	Na_2CO_3	NaCl	KCl	KF
A999	110	116	112	121	140	132	126
Al + 0,5% Si	110	115	111	120	140	134	121
Al + 1% Si	109	114	109	118	139	129	119
Al + 5% Si	109	112	109	117	138	125	117
Al + 10% Si	108	111	106	115	136	124	115
Al + 0,5% Mg	109	113	110	116	138	125	120
Al + 1% Mg	105	109	107	109	135	121	118
Al + 3% Mg	100	104	101	104	132	119	113
Al + 5% Mg	94	98	95	98	128	117	109
Al + 10% Mg	92	95	94	96	125	111	104
Al + 1% Cu	111	115	110	120	140	135	125
Al + 2% Cu	108	114	109	119	140	139	124
Al + 4% Cu	106	110	105	117	142	138	120
Al + 6% Cu	104	108	101	115	144	136	119
АК7ч	108	120	115	125	144	138	131
АК9	119	127	124	131	138	134	120
АК21М2,5Н2,5	104	111	108	120	131	129	114
АК7Ц9	115	121	120	120	134	130	130
АМг5К	109	114	111	111	121	119	115

До начала процесса растекания на этой установке методом лежащей капли определяли поверхностное натяжение σ алюминиевых сплавов. Полученные при минимальном влиянии оксидной пленки результаты позволили снять проблему значительного разброса справочных данных.

Большинство областей применения пористого литого алюминия не предусматривают значительные нагрузки, поэтому использование литейных алюминиевых сплавов с высокими механическими свойствами не требуется. Выбор алюминиевого сплава диктуется высокой коррозионной стойкостью в растворе наполнителя и при эксплуатации отливки. Наиболее вредными примесями, снижающими коррозионную стойкость литейных алюминиевых сплавов, являются железо и медь, присутствие которых во вторичных сплавах практически неизбежно, т.к. лома содержат эти компоненты. При концентрации железа более нескольких сотых долей процента возникают очаговая и питтинговая коррозия. Медь неблагоприятно влияет на химическую стойкость сплава уже при содержании более 0,05%, что не позволяет рассматривать сплавы системы Al-Cu как сырье для производства пористого алюминия. Наличие в сплаве неметаллических частиц также способствует снижению коррозионной стойкости. Чистые сплавы системы Al-Si, Al-Mg (в солевых растворах) и Al-Mg-Si (при оптимальном соотношении концентрации магния и кремния) обладают несколько более высокой коррозионной стойкостью, чем чистый алюминий. Во избежание неприемлемого снижения коррозионной стойкости при значительных объемах производства рекомендуется шихтовка сплава из чистых компонентов, в противном случае следует использовать чистый алюминий не ниже А85. При отсутствии жестких требований к коррозионной стойкости (при быстром выщелачивания наполнителя вследствие малой толщины стенки отливки) для снижения энергозатрат эффективно использовать близкие к эвтектике сплавы системы Al-Si.

Основой технологии получения пористого литого алюминия является пропитка порообразующей засыпки. Для описания этого процесса засыпка наполнителя моделируется фиктивным грунтом – системой шаров. Размер шаров ($2R$) рассчитывался как среднеарифметическое по границам фракции. В рамках этой модели рассчитан гидравлический радиус капилляра r и необходимое для пропитки капиллярное давление (по формуле Лапласа - $P_{кап} = \frac{2\sigma\cos\theta}{r}$). Экспериментальное подтверждение расчетные значения получили в глубоком вакууме (рис.1) . Однако на воздухе давление пропитки не зависит от фракции наполнителя (для фракций более 0,2 мм). Причиной такого явления может быть только оксидная пленка, формирующаяся на поверхности расплава.

Прочность оксидных пленок на поверхности алюминиевых сплавов определялась экспериментально по кривым нагрузка-деформация, передаваемым на тензодатчики от индентора диаметром 1 мм. При внедрении индентора в плену на чистом алюминии до 0-0,1 мм требуется одинаковое

усилие порядка 1-1,5 г. Это свидетельствует о прогибе пленки под нагрузкой. При деформации 0,1-0,12 мм происходит резкое линейное увеличение нагрузки, что свидетельствует о преодолении энергетического барьера – появляется макроскопическая трещина. Затем пленка разрушается практически без нагрузки. Из полученных данных можно рассчитать давление разрыва оксидной пленки:

1. Для чистого алюминия (А999) - $P = \frac{1{,}65 \cdot 10^{-3} кг \times g}{\pi \cdot 10^{-6}/4} = 20600 Па$

2. Для сплава АМг5К - $P = \frac{1{,}14 \cdot 10^{-3} кг \times g}{\pi \cdot 10^{-6}/4} = 14230 Па$,

что хорошо согласуется с результатами экспериментов.

Схема формирования пористой структуры после пропитки наполнителя расплавом представлена на рис.2. Из уравнения Лапласа и геометрических соотношений в воздушной манжете следует формула для расчета минимального радиуса пор: $r_{min} = \frac{-3\sigma + \sqrt{9\sigma^2 - 8\sigma R \Delta P \cos\theta}}{2\Delta P}$,

где ΔP – перепад давлений при пропитке. Определяется как геометрическая сумма давлений: $\Delta P = P_{вн} - P_{ост} + \rho g h$ ($P_{вн}$– давление воздуха над зеркалом расплава; $P_{ост}$– остаточное давление в воздушной манжете; $\rho g h$ - гидростатическое давление расплава).

Формула была подтверждена при исследовании микрофотографий пористой структуры в пакете SIAMS (рис.3). Таким образом, технология изготовления пористого алюминия пропиткой позволяет манипулировать минимальным радиусом пор степенью разряжения при вакуумировании наполнителя (рис.4).

Формирование поверхности отливки имеет свои особенности. Минимальный радиус пор на поверхности раздела металлическая форма – расплав – наполнитель определяется углами смачивания наполнителя и металлической формы. Поскольку поверхность формы сохраняет свою температуру (400-450°С), а скорость заливки велика, то процесс идет в режиме натекания, краевой угол смачивания принимается 180°. По результатам расчета минимальный радиус пор на поверхности отливки в 2,5-2,7 раза больше, чем в объеме.

Рис.1. Давление пропитки

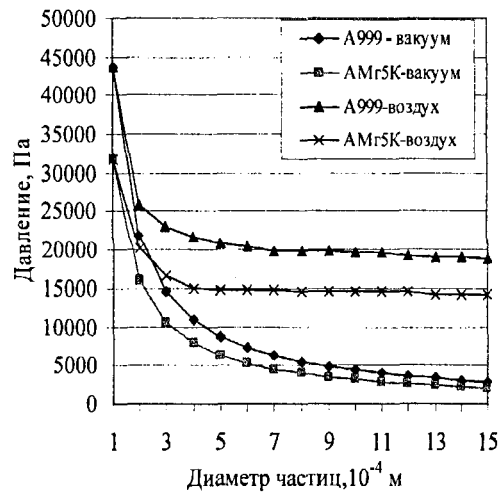


Рис.2. Формирование структуры пористого металла.

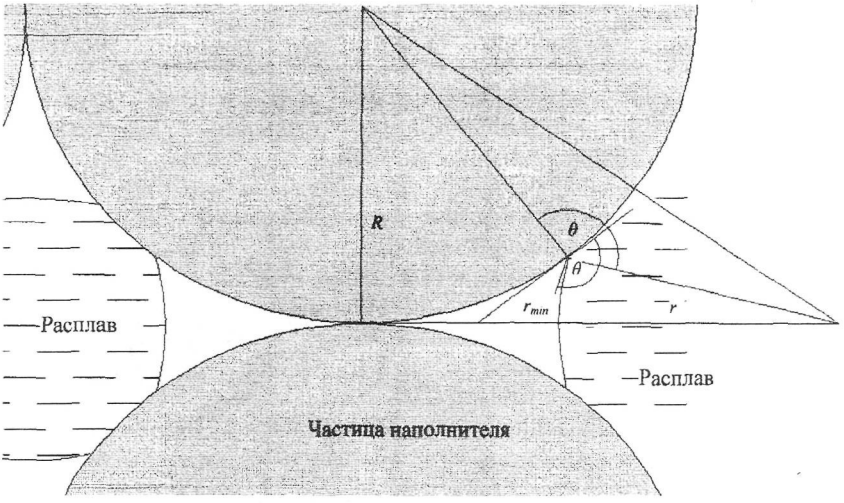
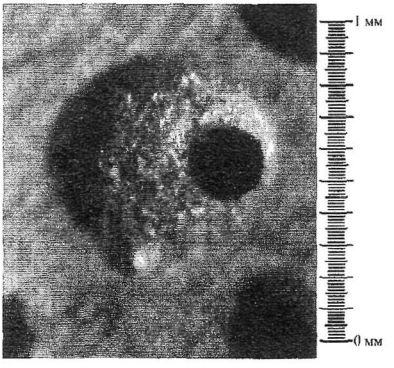


Рис.3. Минимальный радиус пор

Рис. 4. Радиус воздушной манжеты при разряжении 0,25 атм.

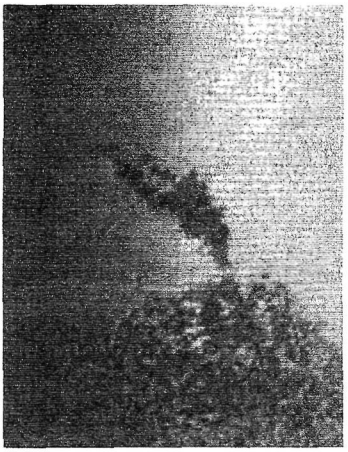




Все используемые в производстве пористого алюминия наполнители имеют плотность ниже плотности расплава. Поэтому свободная частица наполнителя в расплаве всплывает. Одним из факторов устойчивости частиц на поверхности засыпки в расплаве является их сцепление воздушными манжетами, аналогично вакуумным присоскам. Другим фактором, препятствующим всплытию частиц наполнителя, является снижение тела гидростатического давления расплава на них за счет площади, занимаемой воздушными манжетами. Таким образом, оба фактора препятствуют всплытию частиц наполнителя, которое может произойти лишь при динами-

ческом воздействии струи расплава, причем частицы отрываются крупными конгломератами (рис.5).

Рис.5. Всплытие наполнителя



Совершенно иначе ведет себя система Pb-NaCl. Свинец не образует прочной оксидной пленки. Поэтому *капиллярное давление, при котором* начинается пропитка свинцом засыпки NaCl фракции 1-2 мм при пористости 42%, составляет всего 1681 Па, что достигается за счет собственного гидростатического давления с высотой над зеркалом расплава всего 1,5 см. Расплав при движении создает перед своим фронтом область повышенного давления. В заданных условиях из-за небольшой высоты зеркала расплава и высокой плотности свинца на частицу наполнителя действует выталкивающая сила $2{,}12*10^{-5}$ Н. Таким образом, обе действующие силы приводят к всплытию наполнителя, что и наблюдается на практике.

В **третьей главе** исследован гидравлический режим формирования композиционной литой заготовки. Кинетика ламинарной фильтрации несжимаемой жидкости описывается уравнением Дарси:

$$\frac{dl}{d\tau} = \frac{k}{\mu}\frac{\Delta P}{l}$$

где μ – вязкость жидкости;

l – глубина пропитки;

k – коэффициент проницаемости. Существуют различные модели для коэффициента проницаемости засыпок. Максимальную сходимость с проведенным экспериментом для частиц осколочной формы показывает формула Кармана $\frac{d^2 П^3}{180(1-П)^2}$, для сферических частиц – формула Козени $\frac{d^2 П^3}{120(1-П)^2}$ (где $d=2R$; $П$ – пористость наполнителя).

Исследование применимости уравнения Дарси проводилось методом измерения сопротивления нихромовой проволоки, натянутой в форме в направлении течения расплава. Сопротивление пропитанного участка близко к 0, поэтому сопротивление проволоки прямо пропорционально длине непропитанного участка. Для предотвращения влияния изменения термозависимых характеристик (вязкости, поверхностного натяжения расплава) эксперимент проводили в изотермии. Полученные кинетические кривые на значительном удалении от границы раздела расплав-засыпка наполнителя находятся в согласии с уравнением Дарси. Однако на началь-

ном этапе пропитки наблюдается линейная, а не квадратичная, зависимость глубины пропитки от времени. Этот эффект отмечается многими исследователями. Предлагаемое объяснение состоит в учете изменения газового давления на фронте движения расплава.

Решение уравнения Дарси требует расчета давления на фронте движения расплава. Распределение относительного давления по объему засыпки в момент начала движения расплава является решением уравнения Лейбензона:

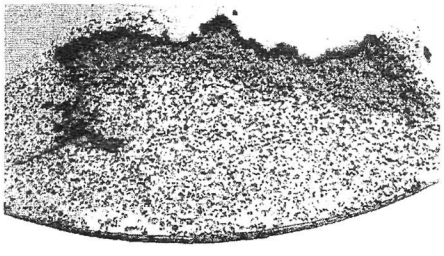
$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{k}{2\Pi \mu_г} \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2}$, где $\mu_г$–динамическая вязкость газа,

для начальных условий атмосферного давления в засыпке.

Для границы вакуум-камера-наполнитель задается постоянное давление, равное давлению ресивера: $P(x=0,\ \tau) = P_{рес}$. Для границы расплав-наполнитель скорость фильтрации газа равна нулю: $\frac{dP}{dx}$ $(x=l, \tau) = 0$. Конечным условием решения задачи падения давления в засыпке наполнителя является достижение давления разрыва оксидной пленки на границе расплав-засыпка наполнителя $P(x=l) = P_{окс}$ (или капиллярного давления – в зависимости от фракции наполнителя) значения которого представлены на рис.1. Для решения уравнения была использована явная схема метода конечных разностей.

Фронт давления не является плоским. При вакуумировании засыпки наполнителя изобары представляют собой суперпозицию сфер с центрами на вентиляционных каналах, расположенных в днище формы. Неравномерность распределения давления по границе раздела расплав-наполнитель приводит образованию локальных потоков расплава. В результате области повышенного давления оказываются со всех сторон окруженными расплавом – возникают газовые раковины, которые являются недопустимым дефектом. Увеличение количества вент, безусловно, даст более равномерное распределение давления, но полностью проблему газовых раковин не решит, т.к. у стенки кокиля скорость течения газа всегда будет ниже, чем в объеме (как видно из рис.6, газовые раковины образуются у стенки кокиля).

Рис.6. Газовая раковина



Часть отливки, содержащая газовые раковины, удаляется, что снижает коэффициент использования металла и не позволяет реализовать одно из важнейших преимуществ пористого литья – сочетание в одном изделии пористой и монолитной части. Наиболее склонны к образованию газовых раковин отливки, изготавливаемые при значительном перепаде давлений.

Для предотвращения образования локальных потоков расплава необходимо стабилизировать давление на границе раздела расплав-наполнитель. Эта задача решается засыпкой поверх слоя основного наполнителя слоя крупнодисперсного наполнителя. Слой крупнодисперсного наполнителя за счет меньшего сопротивления газовому потоку позволяет стабилизировать давление на границе с расплавом до начала пропитки.

Распределение давления по координате засыпки в момент начала пропитки является начальным условием для задачи совместного движения жидкости и газа в пористой среде. Относительное давление на фронте движения расплава описывается выведенной формулой:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{k}{2\Pi\,\mu_{\text{г}}}\frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2} + \frac{Pdl}{\Delta x d\tau}$$, где $\mu_{\text{г}}$ – динамическая вязкость газа,

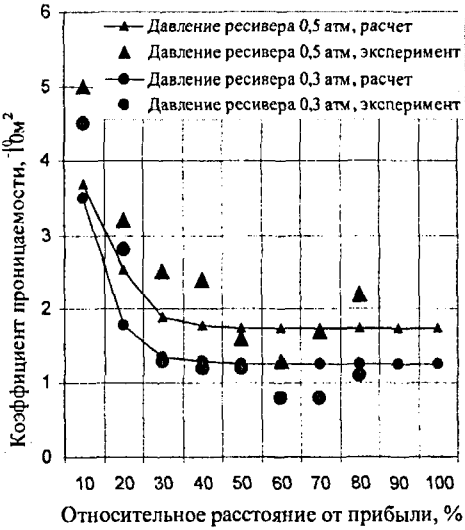
физический смысл которой состоит в увеличении давления в пограничном слое толщиной Δx пропорционально перемещению расплава за счет вытеснения расплавом воздуха.

Расчет изменения давления на фронте пропитки производится решением системы уравнений с одинаковым шагом по времени. Совместное начальное условие для газа и жидкости l=0. Применяемое решение включает уменьшение количества узлов расчетной сетки по мере заполнения засыпки расплавом. В процессе пропитки расплав блокирует воздух в воздушных манжетах, что позволяет экспериментально исследовать динамику давления на фронте пропитки по коэффициенту проницаемости пористого металла.

Результаты эксперимента (рис.7) показывают изменение коэффициента проницаемости по высоте отливки. Глубина разноплотного участка (около 20% от длины отливки) идентична как в теории, так и на практике, что подтверждает эффективность предложенной модели расчета давления на фронте движения расплава.

Можно разделить пропитку на 2 этапа. На первом – давление воздуха на фронте движения расплава изменяется от давления разрыва оксидной пленки до давления ресивера. Относительный

Рис.7. *Изменение коэффициента проницаемости по высоте отливки для фракции 0,315-0,63 мм*



размер этого участка прямо пропорционально зависит от соотношения вязкости газовой и жидкой фаз, но не зависит от фракции наполнителя, что объясняется прямой зависимостью расхода как газовой, так и жидкой фазы от проницаемости засыпки. Расплав на этом этапе движется в условиях переменного перепада давления. На втором этапе течения расплава давление на фронте движения расплава стабилизируется на уровне давления ресивера.

Прочная оксидная пленка, характерная для алюминиевых сплавов, обеспечивает незначительную величину разноплотного участка отливки. В других сплавах, не имеющих этого естественного препятствия пропитке, она начинается при капиллярном давлении, что приводит к увеличению разноплотного участка отливки.

Предлагается для стабилизации давления в наполнителе насыпать поверх слоя наполнителя слой мелкодисперсного наполнителя. Размер частиц мелкодисперсного наполнителя должен быть как можно меньше для создания большего сопротивления течению расплава, но не менее капиллярных зазоров наполнителя для предотвращения их проникновения в основную засыпку. Рекомендуемый размер фракции мелкодисперсного наполнителя 0,4-0,5 от основного наполнителя. Расплав заливается на поверхность мелкодисперсного наполнителя. Во время течения расплава при большем сопротивлении в мелкодисперсном наполнителе давление в основном наполнителе стабилизируется на уровне давления вакуумресивера. Благодаря стабильности давления в засыпке основного наполнителя при пропитке разноплотность не превысит 2%. После затвердевания отливки в процессе механической обработки участок, заполненный мелкодисперсным наполнителем, удаляется, либо его поверхность «затирается» режущим инструментом.

При изготовлении композиционных литых заготовок волна повышенного давления (гидравлический удар) является следствием резкой остановки расплава в момент окончания пропитки. Известно, что при воздействии на водонасыщенные несвязанные или малосвязанные грунты вибрацией или ударной нагрузкой происходит разрушение его структуры с переупаковкой частиц. В областях сжатия стоячей ударной волны гидравлического удара происходит консолидация жидкости, нарушается связность каркаса наполнителя. При изготовлении композиционной литой заготовки наблюдаются аналогичные нарушения структуры, называемые просечками (рис.8) – дефектом в виде прожилок металла. На рис.9. проведена линия тренда по среднеарифметическому расстоянию просечек от днища кокиля. Анализ в программе Excel показал линейность полученной функции с очень высокой степенью достоверности аппроксимации, что убедительно под-

Рис.8. Просечки.

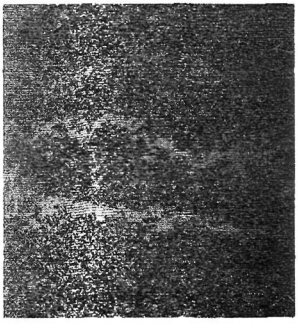
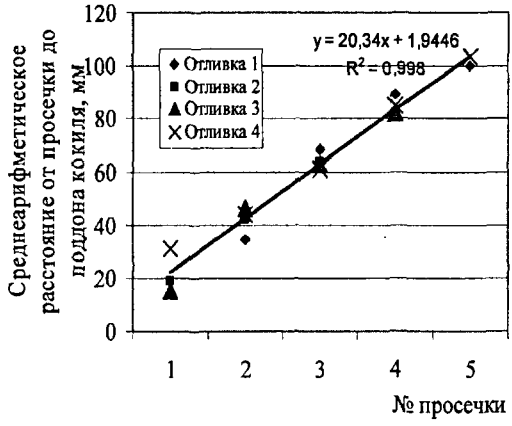


Рис.9. Расположение просечек на отливках



твердает волновую гипотезу происхождения дефекта. Просечки обычно не оказывают существенного влияния на технологические свойства пористых отливок, поскольку они расположены параллельно потоку фильтруемой среды. Однако страдает внешний вид готовых изделий, который является важным маркетинговым фактором. С другой стороны, гидроудар обеспечивает пропитку наполнителя вблизи поверхности металлической формы, что позволяет снизить температуру нагрева кокиля, повышая его стойкость, а также сокращается цикл изготовления отливок.

Согласно совместному решению уравнений Жуковского и Дарси давление гидроудара зависит от технологических параметров изготовления отливки (коэффициент проницаемости засыпки, перепад давления, высота отливки). Все вышеперечисленные факторы задаются потребителем для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств готового изделия. Поэтому необходимо использовать специальные технологические приемы для гашения скорости расплава:

1. Слой мелкодисперсного наполнителя (фракция 0,1-0,2 мм) у днища металлической формы. Однако необходимая толщина слоя превышает разумные пределы.
2. Промывники конического сечения в днище металлической формы (рис.10), размер которых был подобран экспериментально (табл.2), обеспечивая как преодоление поверхностной непропитки, так и предотвращение формирования просечек.

Рис.10. Кокиль с промывниками

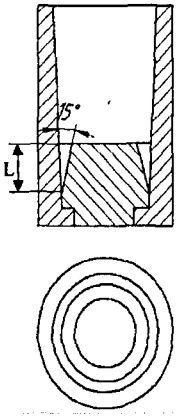


Таблица 2

Глубина промывников (L)

Давление ресивера, атм	0,6	0,4	0,2	0,01
Глубина промывников, см	2	3	3,5	4

Четвертая глава посвящена кристаллизации композиционной литой заготовки, полученной в результате изотермической пропитки. Изотермическая пропитка позволяет гарантированно избежать неполного образования композиционной литой заготовки вследствие недостаточной жидкотекучести расплава в капиллярных зазорах наполнителя (рис.11). Для моделирования процесса кристаллизации необходимо выявить теплофизические характеристики композита. Плотность и теплоемкость композита определяется аддитивно, а теплопроводность лимитируется минимальным сечением металла перпендикулярно тепловому потоку. Теплопроводностью наполнителя вследствие его малости относительно теплопроводности металла можно пренебречь. Результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными подтверждают адекватность модели (табл.3).

Рис.11. Непропитка

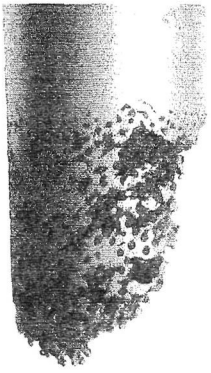


Таблица 3

Исследование теплопроводности композита

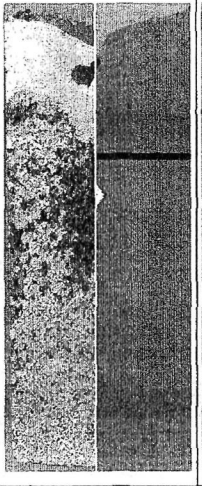
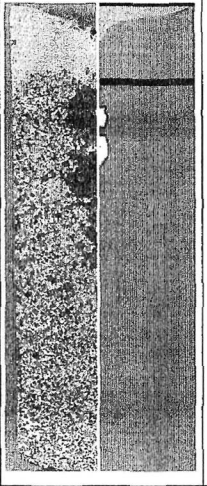
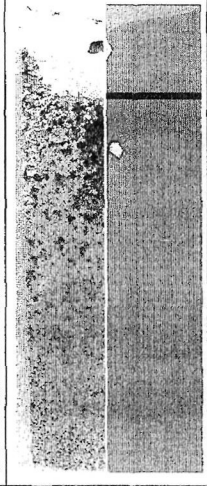
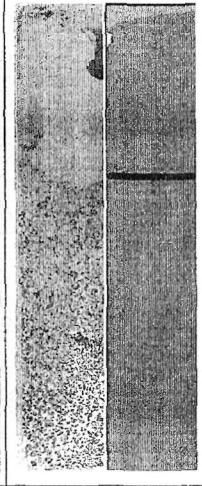
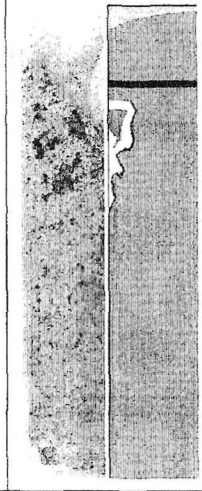
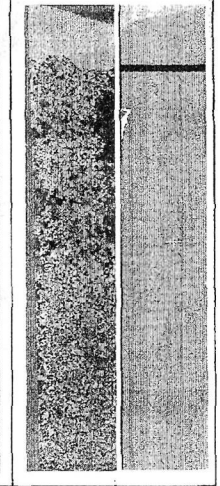
Параметры эксперимента	Вариант 1	Вариант 2
Фракция наполнителя, мм	0,315-0,63	1-1,5
Пористость засыпки	0,32	0,42
Расчетная теплопроводность, Вт/м*К	23,15	42,12
Экспериментальная теплопроводность, Вт/м*К	24,7	48,5
Отклонение, %	6,4	13,2

Моделирование кристаллизации при одинаковой начальной температуре компонентов проведено в программе ProCast в следующих начальных условиях:

- Температура наполнителя и расплава 700 °С;
- Температура кокиля 400 °С
- Сплав – алюминий А999;
- Наполнитель –NaCl . Для предотвращения спекания в процессе подогрева до 700 °С использовался наполнитель наиболее крупной фракции > 4 мм;
- Кокиль цилиндрический: толщина стенки – 20 мм; внутренний диаметр 160 мм; высота полости 420 мм.

Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными представлены на рис.12. Необходимо отметить, что моделирование в композиционной части отливки показывает только форму и расположение усадочной раковины. Композиционная часть отливки моделируется как сплав, однако композит более чем наполовину состоит из наполнителя, тогда как усадочная раковина образуется только за счет расплава. Поэтому

Рис.12. *Влияние технологических факторов на форму и расположение усадочной раковины* образующейся в композиционной литой заготовке после изотермической пропитки

						
Сплав	А999	А999	А999	А999	АМг10	А999
Доля расплава, %	38	38	45	45	38	38
Толщина стенки кокиля, мм	20	20	20	20	20	10

экспериментальная усадочная раковина по объему будет превышать расчетную в *1/П* раза (где *П* – начальная пористость наполнителя).

При объемном содержании расплава в композите 38% (уплотнение наполнителя производилось вибрацией) увеличение цельнометаллической части отливки не приводит к выведению в нее усадочной раковины. Высокая скорость теплопередачи на кокиль приводит к разделению отливки на 2 зоны питания. При значительных размерах прибыльной части отливки в ней формируется усадочная раковина, возможно открытая, другая раковина формируется в композите. При малых размерах прибыльной части отливки граница раздела зон питания проходит по композиционной части отливки, в ней формируются 2 отдельные усадочные раковины. Усадочная раковина формируется в композиционной части отливки вблизи границы с прибыльной частью независимо от соотношения их размеров. При объемном содержании расплава в композите 45%, благодаря большей доле расплава выделяется больше скрытой теплоты кристаллизации (которая у алюминия весьма значительна), и теплопроводность композита увеличивается, что обеспечивает при значительном размере прибыльной части полный вывод усадочной раковины в прибыль. Однако добиться объемной доли расплава 45% можно, только используя наполнитель осколочной формы, что неблагоприятно сказывается на эксплуатационных свойствах гото вого изделия. Максимальная доля глобулярного наполнителя в условиях свободной засыпки составляет около 42%.

Широкий интервал кристаллизации сплава АМг10 приводит к формированию открытой усадочной раковины значительно меньше, чем у чистого алюминия, усадочные дефекты сосредоточены вблизи границы раздела расплав-засыпка наполнителя в композите. Питание композиционной части отливки из прибыли при использовании широкоинтервальных сплавов прекращается раньше, чем при использовании сплавов эвтектического состава и чистых металлов. Таким образом, использование широкоинтервальных сплавов с точки зрения минимизации усадочных дефектов в композиционных отливках нежелательно.

Уменьшение толщины стенок металлической формы приводит к снижению скорости охлаждения отливки в направлении кокиля. Таким образом, улучшаются условия питания отливки, объем закрытой усадочной раковины в композите уменьшается, формируется открытая усадочная раковина большой глубины в прибыльной части отливки. Форма усадочной раковины в композите вытянутая, ее нижний край находится на такой же высоте, что и для отливок, залитых в массивный кокиль. Аналогичные результаты дает и увеличение полости формы без уменьшения толщины ее стенки. Таким образом, уменьшение соотношения стенки металлической формы и размера отливки также не позволяет поднять усадочную раковину.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало, что расчетные характеристики теплофизических свойств композита алюминий-NaCl и граничные условия позволяют выявить фор-

му и расположение усадочной раковины в композиционных литых заготовках. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Расположение усадочной раковины в отливке зависит от соотношения цельнометаллической и композиционной части и от доли расплава в композите. Полный вывод усадочной раковины в прибыль может быть обеспечен увеличением этих параметров.
2. Форма усадочных дефектов определяется геометрией металлической формы и интервалом кристаллизации сплава.

Поскольку раковина формируется непосредственно под прибыльной частью отливки, возникает вопрос о целесообразности вывода усадки в прибыль. Возможно, более эффективным технологическим решением будет удаление части композиционной заготовки вместе с усадочной раковиной. Однако такое технологическое решение не позволяет уменьшить пораженную усадкой часть отливки. Также цельнометаллическая часть отливки может быть переплавлена в качестве возврата, в отличие от композиционной.

Формирование усадочной раковины в композиционной части отливки обусловлено ее низкой теплопроводностью. В процессе кристаллизации прибыльная цельнометаллическая часть отливки затвердевает быстрее, и, соответственно, питается из композиционной. Возможности увеличения теплопроводности композиционной части отливки за счет повышения доли расплава в композите на практике связаны с применением наполнителя осколочной формы и крайне незначительны, наоборот, можно только уменьшить долю расплава уплотнением наполнителя. Принцип направленной кристаллизации можно реализовать двумя способами:

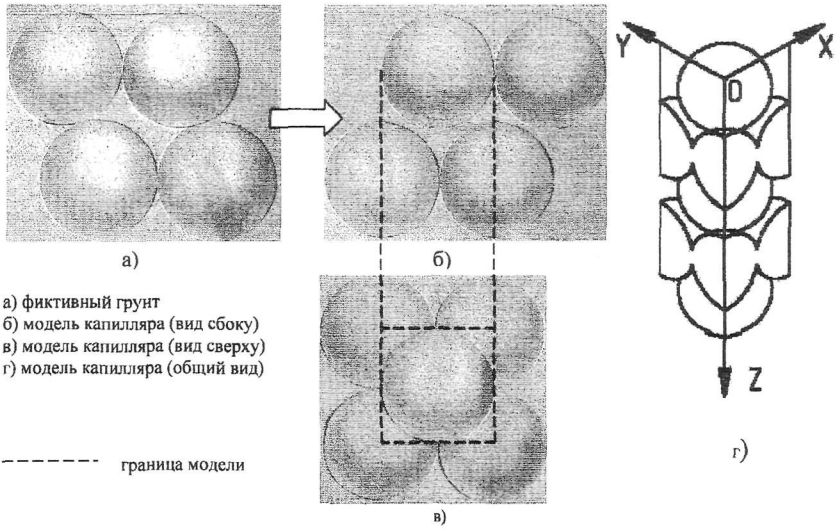
1. Увеличивая прибыльную цельнометаллическую часть отливки, что позволит затормозить ее кристаллизацию за счет выделения скрытой теплоты кристаллизации (уровень которой в алюминиевых сплавах чрезвычайно высок).
2. Использованием неизотермической пропитки. В результате неизотермической пропитки формируются начальные условия, благоприятные для реализации принципа направленной кристаллизации.

Очевидно, что применение неизотермической пропитки не только способствует направленной кристаллизации, но и является экономически эффективным мероприятием, сокращая затраты на нагрев наполнителя.

В **пятой главе** исследована неизотермическая пропитка засыпки наполнителя расплавом. Экспериментальное исследование глубины неизотермической пропитки было проведено методом планируемого эксперимента по следующим факторам: температура и фракция наполнителя, температура расплава, перепад давления при пропитке. Построенные уравнения регрессии не носят универсальный характер, для каждого сплава необходимо проводить новую серию экспериментов. Поэтому для прогнозирования неизотермической пропитки предложено использовать программу ProCast. Аппроксимация засыпки наполнителя моделью фиктивного грун-

та в программе требует минимизации расчетной области, которая должна иметь минимальную площадь сечения в направлении, перпендикулярном вектору течения расплава. Таким образом, геометрия пористой среды представляется объемным капилляром, который формируется путем параллельного смещения шарового элемента модели фиктивного грунта (рис.13). Пористость системы остается неизменной. Перепад давления при пропитке принимался постоянным - не учитывалась динамика давления на фронте движения расплава. Коэффициент теплоотдачи в системе расплав-наполнитель подбирался для обеспечения соответствия расчета эксперименту. Используя построенную модель, была проведена серия компьютерных экспериментов по анализу влияния указанных выше факторов. Результаты моделирования пропитки в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис.14-15.

Рис.13. Формирование модели объемного капилляра



По результатам эксперимента (температура расплава 750°С) (фракция 0,135-0,63 мм, перепад давления 0,6 атм) видно, что прогрев наполнителя на 10°С оказывает такое же влияние на глубину пропитки, как 40 °С прогрева расплава. Поскольку теплоемкости расплава алюминия и NaCl близки, очевидна экономическая эффективность пропитки при минимальной температуре заливки расплава - для чистого алюминия 700°С. Перепад давления также оказывает влияние на глубину пропитки, однако использовать этот фактор для управления процессом пропитки невозможно, так как он определяет структуру и свойства готового изделия.

Рис.14. Влияние температуры наполнителя на глубину пропитки

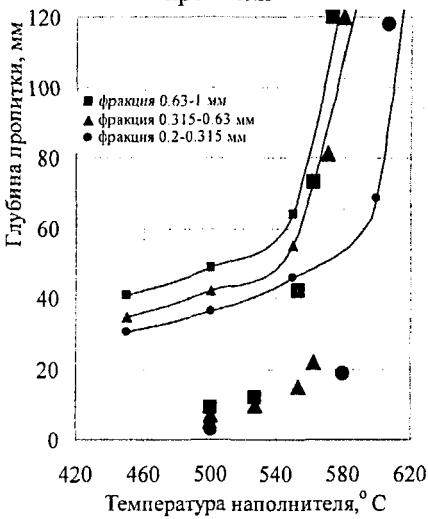
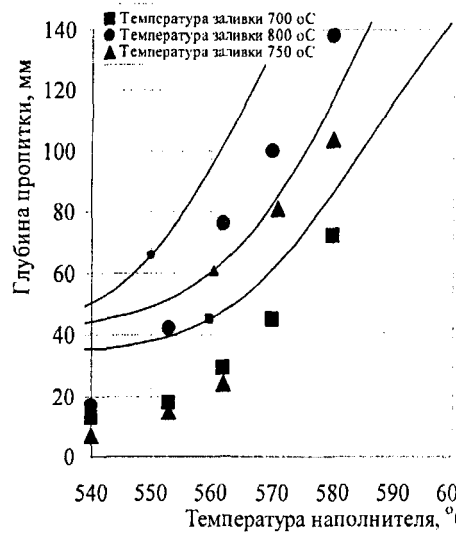


Рис. 15. Влияние температуры заливки на глубину пропитки



Как натурный, так и компьютерный эксперимент показывают наличие критической температуры подогрева наполнителя, выше которой глубина пропитки резко возрастает. Величина критической температуры определяется теплообменом при движении расплава в наполнителе, и зависит от фракции наполнителя, его пористости, давления пропитки и температуры заливки расплава. Наиболее ярко выражена критическая температура подогрева наполнителя для мелких фракций за счет квадратичного увеличения поверхности раздела фаз. Компьютерное моделирование показало меньшие значения глубины пропитки в критической точке, так как расплав на начальном этапе течения движется с меньшей скоростью вследствие постепенного падения давления от давления разрыва оксидной пленки до давления ресивера. Тем не менее, поскольку размер пористых отливок значительно превышает глубину пропитки при критической температуре, разработанная модель позволяет определить минимально возможную температуру подогрева наполнителя в производственной практике.

Для расчета критической температуры подогрева наполнителя использована модель, представляющая собой совместное решение уравнения жидкотекучести по М.Флемингсу и уравнения Дарси в системе фиктивного грунта. Выведенная формула имеет вид:

$$T_{н} = T_{кр} - d\left(\frac{\rho(ir + c\Delta T)\Delta P \Pi^{4}}{34560(1-\Pi)^{3}\alpha\mu}\right),$$ где $T_{м}$ – температура кристаллизации металла; d – диаметр частиц наполнителя; ΔT – перегрев металла; r, c, ρ, μ – скрытая теплота кристаллизации, теплоемкость, плотность и динамическая

вязкость металла; i – доля жидкой фазы в расплаве, при которой прекращается течение; $П$ – пористость наполнителя; ΔP –перепад давления (на начальном этапе течения принимаем равным давлению разрыва оксидной пленки); α - коэффициент теплоотдачи (определялся по сходимости с экспериментом).

Таблица 4

Критическая температура подогрева наполнителя

	Критическая температура подогрева наполнителя, °С		
Фракция наполнителя, мм	0,63-1	0,315-0,63	0,2-0,315
Расчет	452	552	586
Эксперимент	*500*	*555*	*580*

Значительное расхождение с экспериментом для крупной фракции наполнителя может быть обусловлено осколочной формой зерен, в отличие от мелких фракций, что приводит к снижению скорости течения расплава с одновременным увеличением удельной поверхности раздела расплав-наполнитель. В результате интенсивность теплообмена возрастает, что требует увеличения критической температуры подогрева наполнителя. В формулу необходимо ввести поправочный коэффициент, учитывающую осколочную форму наполнителя. Оптимальное соответствие экспериментальным данным дает использование приведенной фракции наполнителя $d_{пр}$ с коэффициентом 0,75 ($d_{пр}$=0,75d). Для проверки этой гипотезы проведен дополнительный эксперимент с крупной фракцией наполнителя осколочной формы (1-1,5 мм) и с мелкой фракцией, полученной размолом с последующим рассевом. Результаты расчета в сравнении с экспериментом представлены в табл.5.

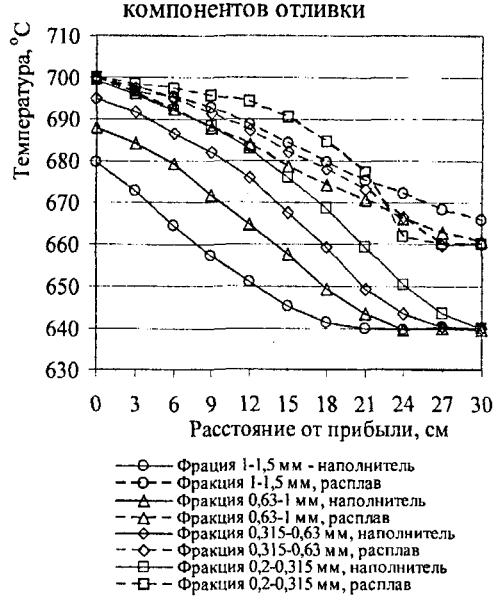
Таблица 5

Критическая температура подогрева наполнителя осколочной формы

	Критическая температура подогрева наполнителя, °С		
Фракция наполнителя, мм	1-1,5	0,63-1	0,315-0,63
Расчет	419	496	579
Эксперимент	*420*	*500*	*570*

Термические начальные условия для задачи кристаллизации композиционной литой заготовки формируются как результат задачи пропитки наполнителя расплавом (рис.16). Увеличение фракции наполнителя приводит к увеличению скорости пропитки (т.е. уменьшению времени теплообмена), и снижению теплового потока на границе раздела расплав-наполнитель за счет квадратичного уменьшения площади поверхности раздела. Поэтому зерна наполнителя крупной фракции прогреваются медленно, градиент температур в системе зерно наполнителя – расплав остается практически неизменным, тепловой поток стабилен во времени, температура расплава по глубине пропитки меняется практически линейно

Рис.16. Влияние фракции наполнителя на температуру компонентов отливки



(*dT/dy=const*). Полученные данные соответствуют результатам работ М.Флемингса для течения расплава в каналах литейной формы.

Наоборот, уменьшение фракции наполнителя приводит к его быстрому прогреву, особенно вблизи прибыльной части. Благодаря ковровому механизму течения в этой части отливки температура расплава близка к температуре в прибыли, поскольку в ней за время течения происходит полный прогрев наполнителя и, соответственно, резко падает интенсивность теплообмена. В удаленной от прибыли части отливки большая площадь теплообмена приводит к быстрому падению температуры расплава, и даже выпадению твердой фазы. Градиент температур *dT/dy* в верхней части отливки у прибыли меньше, чем у отливок с крупной фракцией наполнителя, а в нижней части отливки больше. Полученные данные для мелких фракций близки к результатам работ по неизотермической пропитке волокнистых микрокомпозитов с долей наполнителя 15-20%, в которых исследователи также выделяют 2 четко выраженные зоны:

1. «Верхняя» зона: температура близка начальной температуре расплава.
2. «Нижняя» зона: температура близка температуре кристаллизации.

Также было исследовано влияние других технологических факторов на градиент температуры расплава и наполнителя по высоте отливки:

- повышение перепада давления и уменьшение длины отливки в направлении пропитки уменьшают время теплообмена в системе расплав-зерно наполнителя. Поэтому температурные кривые смещаются как при увеличении фракции наполнителя.
- повышение пористости наполнителя увеличивает скорость течения расплава и снижает поверхность контактного теплообмена, что также приводит к смещению температурных кривых как при увеличении фракции наполнителя.
- повышение температуры расплава или снижение температуры наполнителя в исследуемом диапазоне практически не оказывают влияние на

форму температурных кривых. Очевидно, что увеличение температурного напора приводит к некоторому ускорению прогрева наполнителя и соответствующему охлаждению расплава.

Моделирование кристаллизации композиционной литой заготовки после неизотермической пропитки позволило рассчитать минимальный размер прибыльной части отливки для вывода в него усадочной раковины. Он составил 18-40% от высоты композиционной части отливки. Наибольшее влияние на высоту прибыльной части отливки оказывает фракция и пористость наполнителя, уменьшение которых приводит к необходимости повышения температуры нагрева наполнителя.

Для предотвращения формирования усадочных дефектов в отливках, изготовленных с применением мелкой фракции наполнителя интенсификацию принципа направленной кристаллизации можно обеспечить доливом жидкого металла в прибыль или использованием теплоизолирующих крышек кокиля.

Формирование композиционной литой заготовки происходит не изолированно в системе расплав-наполнитель, а в металлической форме, которая оказывает влияние на термический режим технологического процесса. Между заполнением кокиля наполнителем и пропиткой его расплавом есть ряд технологических операций, время выполнения этих операций составляет не менее 20 с. В это время происходит теплообмен между засыпкой наполнителя и металлической формой. Расчет охлаждения напслнителя в металлической форме (теплопроводность засыпки наполнителя определялась по модели Дульнева) был проверен экспериментом.

При охлаждении наполнителя в кокиле можно выделить два ярко выраженных этапа. Первый этап начинается с момента засыпки наполнителя в кокиль и продолжается 30-40 секунд. На этом этапе происходит выравнивание температуры пристеночного слоя наполнителя и кокиля. Определяющим параметром на этом этапе является температура кокиля. Изменение толщины стенки кокиля и условий теплоотдачи на границе кокиль-атмосфера согласно расчету не оказывает значимого влияния на процесс охлаждения пристеночного слоя. На втором этапе происходит равномерное охлаждение наполнителя и кокиля. Скорость охлаждения определяется толщиной стенки кокиля, его диаметром и условиями теплообмена на границе кокиль-атмосфера. Однако время остывания засыпки в кокиле при производстве композиционных литых заготовок не выходит за рамки первого этапа.

При охлаждении происходит формирование пристеночного слоя наполнителя, температура которого падает ниже критической, и он может быть пропитан только при значительном повышении давления при гидроударе. Однако размеры воздушных манжет в этом слое будут отличаться от основного объема отливки. Поскольку неоднородность свойств наблюдается по поверхности отливки, пристеночный слой удаляется как припуск на механическую обработку.

В **шестой главе** исследован процесс выщелачивания наполнителя из композиционной литой заготовки. При недостаточно полном удалении наполнителя из тела отливки происходит реакция в присутствии паров воды: $Al^{3+} + 3OH^{-} = Al(OH)_3$ с образованием нерастворимого гидроксида алюминия, забивающего поры. В ходе реакции разрушается оксидная пленка, предохраняющая отливку от коррозии, что приводит к ее быстрому разрушению. С другой стороны, при длительном ведении процесса происходит опять же реакция, что делает дальнейшую выщелачивание невозможным из-за закупорки пор нерастворимым гидроксидом. Следовательно, процесс извлечения наполнителя из внутреннего объема композиционной литой заготовки необходимо проводить как можно быстрее. Диффузионный режим выщелачивания невозможен, поскольку, как показал расчет, время растворения наполнителя в композиционной литой заготовке толщиной всего 5 мм составляет более 9 дней.

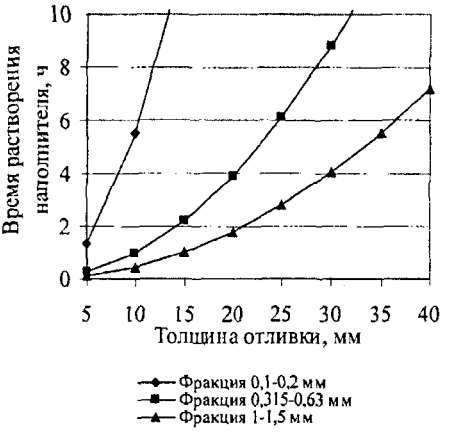
Интенсификация выщелачивания наполнителя возможна при организации вынужденной конвекции растворителя. Практически это осуществляется установкой композиционной литой заготовки под свободную струю. В поверхностном слое пористого литого материала образуется циркуляционная зона, в которой идет интенсивный массообмен с потоком, омывающим наружную поверхность отливки. Этим способом можно выщелачивать наполнитель из композиционных литых заготовок с тонкой стенкой (до 6 мм).

Универсальный способ ускоренного извлечения наполнителя открывается благодаря усадочным микрозазорам между частицами наполнителя и матричным металлом. Зазор формируется из-за большего коэффициента линейного расширения NaCl, чем у алюминиевых сплавов. Усадочная модель формирования зазора проверена по подъему керосина по композиционной литой заготовке. Управление величиной зазора согласно усадочной модели его формирования возможно путем варьирования температуры подогрева наполнителя и заливки расплава. Но температурный режим пропитки установлен ранее, и перегрев компонентов композиционной литой заготовки приведет не только к незначительному увеличению зазора, но и к значительным усадочным раковинам. Поэтому величина усадочного зазора в основном определяется фракцией наполнителя.

Для определения минимального времени растворения наполнителя (рис.17) в процессе фильтрации сквозь тело композиционной литой заготовки была решена система уравнений Щукарева – Нернста и Дарси для щелевого капилляра. Как показывает производственная практика, полученные данные несколько превышают необходимое время полного выщелачивания наполнителя из отливки. В процессе растворения частица наполнителя уменьшается в размерах и может быть удалена из тела отливки потоком воды при достижении ей минимального радиуса пор.

Однако, как было показано ранее, длительное нахождение композиционной заготовки в воде приводит к полной потере проницаемости. Поэтому при изготовлении пористых отливок со значительной толщиной стенки или с применением мелкой фракции наполнителя необходимо использовать не NaCl, а другой наполнитель с более высокой предельной концентрацией насыщенного раствора (KF).

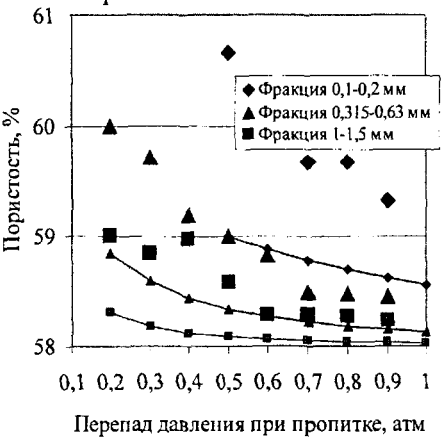
Рис.17. Расчетное время растворения наполнителя



Седьмая глава посвящена прогнозированию эксплуатационных свойств пористого литого металла, что необходимо для конструирования готовых изделий.

Важнейшей характеристикой любого пористого тела является пористость, функцией которой являются многие эксплуатационные свойства готовых изделий. Геометрическое моделирование и экспериментальное исследование пористости (рис.18) показало невозможность регулирования ее в широких пределах фракцией наполнителя или давлением пропитки (максимум 2%). Таким образом, пористость пористого литого металла $П_м$ можно с удовлетворительной точностью рассматривать как функцию пористости наполнителя $П$: $П_м=1-П$. Единственная возможность регулирования пористости – уплотнение наполнителя, что позволяет варьировать ее в диапазоне 53-75% (для монофракционного наполнителя).

Рис.18. Пористость пористого литого металла

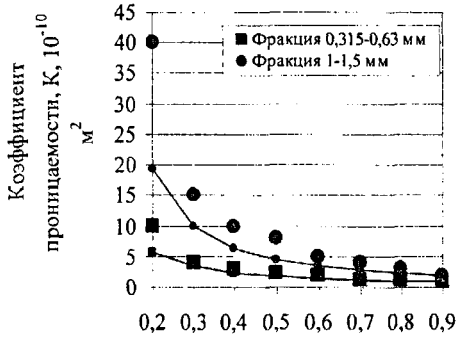


Поскольку геометрическое моделирование показало свою эффективность при оценке пористости, то этим методом была выявлена и максимально возможная удельная поверхность пористого литого металла – 22000 $м^{-1}$.

Модель проницаемости пористого литого металла основана на следующем допущении: сопротивление потоку фильтруемой среды представляют только отверстия радиуса r_{min} (минимальный радиус пор), которые аппроксимируются отвер-

стием в тонкой стенке. Полученная в результате моделирования течения жидкости при малых числах Рейнольдса формула для расчета коэффициента проницаемости имеет вид: $K = \frac{(1-П)N \cdot r_{min}^3}{6\pi R}$, где N – координационное число. Измерение коэффициента проницаемости пористого литого металла при переменном гидростатическом давлении фильтруемой среды показало удовлетворительную сходимость с экспериментом (рис.19). Наибольшее расхождение наблюдается при малом перепаде давления, так как образуется воздушная манжета больших размеров – становится неправомерным допущение о минимальном радиусе пор как отверстии в тонкой стенке.

Рис.19. Коэффициент проницаемости пористого литого алюминия



Пористый литой алюминий является весьма перспективным материалом для фильтрации рабочих жидкостей и газов промышленного оборудования и транспортных средств. Фильтровальная способность пористых материалов характеризуется номинальной тонкостью фильтрации и коэффициентом проскока мелких фракций. Анализ экспериментальных данных, полученных в ОМУ НПО НАТИ показал, что в пористом литом металле номинальная тонкость фильтрации соответствует минимальному диаметру пор, а коэффициент проскока мелких фракций может быть найден по формуле: $K_{II} = \left(r_{min}/R\right)^{l/200R}$, где l – толщина фильтроэлемента.

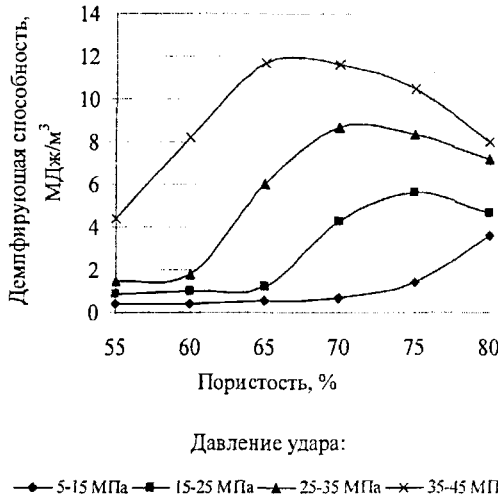
Изделия из пористого литого алюминия в машинах и механизмах работают в условиях перепада давлений, поэтому необходимо знание его механических свойств. Экспериментальное исследование механических свойств пористого литого алюминия (проведено на ОАО АвтоВАЗ) позволило выявить его структурный фактор (2,6) в уравнении Бальшина $\sigma_в = \sigma_{во}\left(1 - П_и\right)^{2,6}$, где $\sigma_в$ – временное сопротивление пористого материала; $\sigma_{во}$ – временное сопротивление компактного материала.

Способность пористого металла поглощать энергию удара позволяет использовать его в качестве одноразовых демпферов в конструкции автотранспортных средств. Демпфирующая способность исследуется экспериментально методом ударного маятника по необратимой пластической деформации пористого металла. Демпфирующая способность увеличивается с ростом пористости и давления удара до определенного предела, за кото-

рым происходит не ческая деформация, а шение структуры пористого каркаса.

Пористый литой алюминий является перспективным материалом для изготовления звукопоглощающих конструкций. Для расчета коэффициента нормального звукопоглощения была использована модель Рэлея, адаптированная для пористого литого металла. Методика расчета хорошо подтверждается экспериментальными данными, полученными на ОАО АвтоВАЗ.

Рис.20. Демпфирующая способность пористого литого алюминия



В **восьмой главе** разработаны методики конструирования изделий из пористого алюминия, а также проведено их сравнение с аналогами из других материалов.

Основная область применения пористого литого алюминия - фильтроэлементы. В настоящее время важной задачей при их разработке в связи с ростом стоимости труда является увеличение ресурса работы до очистки, т.е. грязеемкости. Разработанная модель засорения пористой литой структуры позволила сформулировать рекомендации по технологическим параметрам изготовления фильтроэлементов: использовать наполнитель фракции 0,2-0,32 мм при максимальном перепаде давления пропитки. Структура пористого литого металла исключительно благоприятна для фильтрации. Большое соотношение минимального и максимального радиуса пор определяет инерционный механизм осаждения загрязняющих частиц на внутренней поверхности фильтроэлемента (в отличие от спеченных фильтроэлементов, основанных на значительно менее эффективном механическом осаждении). Сравнение литых и спеченных фильтроэлементов с одинаковой номинальной тонкостью фильтрации и коэффициентом проскока мелких фракций (табл.6) показывает однозначное преимущество первых в силу значительно более высокой грязеемкости и на порядок меньшего гидравлического сопротивления. Высокая эффективность фильтрации в пористом литом металле обусловлена преимущественно инерционным механизмом осаждения частиц вследствие значительного соотношения минимального и максимального радиуса пор.

Таблица 6

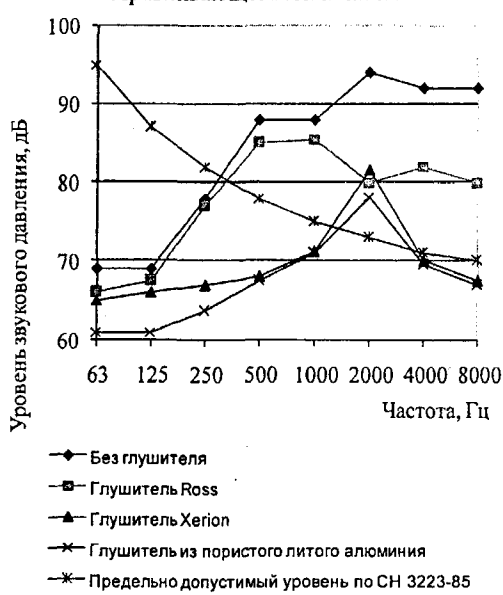
Сравнительная характеристика фильтроэлементов с минимальным размером пор (номинальная тонкость фильтрации) 80 мкм

Тип фильтра	Пористость, %	Коэффициент проницаемости, $k \cdot 10^{-10}$ м^2	Коэффициент проскока мелких фракций при толщине фильтроэлемента 5 мм, %	Грязеемкость, при снижении коэффициента проницаемости в 2 раза, % по объему
Спеченный (бронза)	30	0,18	80	17
Литой (алюминий)	60	1,5	76	45

Глушители выхлопа пневмооборудования из пористого литого алюминия устанавливаются на выхлопное отверстие. Уровень шума снижается благодаря уменьшению линейной скорости воздуха вследствие увеличения площади сброса. Но снижать скорость бесконечно невозможно, т.к. глушитель должен обеспечить падение давления в выхлопной камере пневмоагрегата. На основании совместного решения уравнения Менделеева-Клапейрона для выхлопной камеры и Дарси для пористой стенки глушителя разработана методика расчета площади поверхности глушителя. Минимальная толщина стенки определяется расчетом механической прочности.

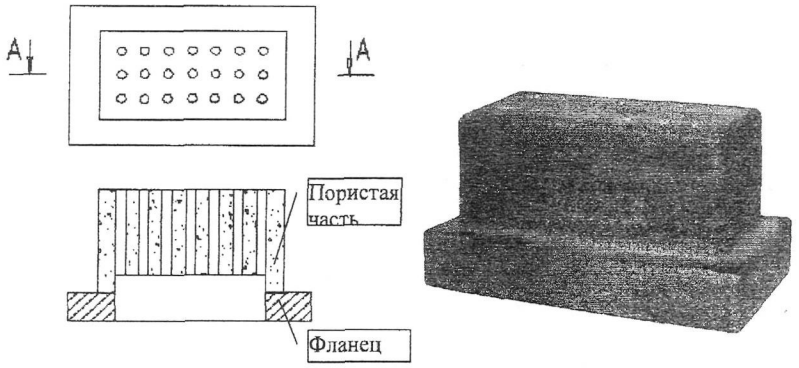
Уровень шума при использовании глушителей из пористого литого алюминия в сравнении с глушителями фирмы «ROSS» и «Xerion» (изготавливаются из металлических сеток и минеральной ваты в перфорированном металлическом корпусе) был исследован в лаборатории ОАО «АвтоВАЗ» на акустическом интерферометре фирмы «Брюль и Кьер». Спектры уровней звукового давления различных типов глушителей прессов в сравнении с СН 3223-85 приведены на рис.21. Глушитель из пористого алюминия оказался наиболее эффективным из испытанных.

Рис.21. Уровень звукового давления стравливающего клапана 1/2'



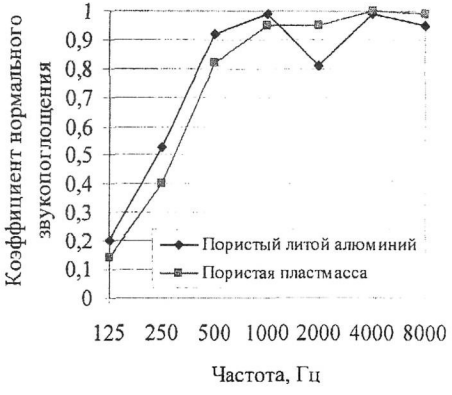
Ограничением для исследованной конструкции глушителя является небольшой объем сбрасываемого воздуха. По уравнению Дарси, повысить расход можно сокращением толщины пористой стенки (что приведет к увеличению скорости воздуха), или/и увеличением ее площади. Для решения этой проблемы разработан глушитель шума коробчатой конструкции, сброс давления в котором идет при течении воздуха по сквозным каналам с пористой стенкой, аналогично глушителям выстрела. Результаты сравнительных испытаний, проведенных в ОАО «Пневмоаппарат» показали существенное преимущество глушителей коробчатой конструкции (рис.22) по сравнению с серийно выпускаемыми по пневматическим характеристикам и практически полное соответствие их по шуму санитарным нормам.

Рис.22. Глушитель шума коробчатой конструкции



Использование пористого алюминия в конструкциях транспортных средств может иметь перспективу за счет сочетания на высоком уровне демпфирующей и звукопоглощающей способности, а также огнестойкости. Сравнительные испытания (рис.23) показали, что коэффициент звукопоглощения пористого алюминия и пористой пластмассы (используемой в настоящее время в конструкциях транспортных средств) близки. Но однородность структуры, обеспечиваемая технологией

Рис.23. Коэффициент нормального звукопоглощения



производства пористого литого алюминия, позволяет изготавливать звукопоглощающие конструкции, обеспечивающие максимальное звукопоглощение в нужном диапазоне частот (табл.7).

Таблица 7

Рекомендуемые характеристики шумопоглощающих щитов

Частота, Гц	Коэффициент проницаемости, 10^{-10} м^2	Толщина щита, мм	Величина воздушного зазора, мм
500	5	20	500
1000	5	20	40
2000	2	20	15
4000	2	12	0
8000	2	4	0

Широкое применение в промышленности находят фильтроэлементы влагомаслоотделителей из пористого литого алюминия. Проведен качественный анализ абсорбции паров воды в пористом объеме, на основе которого сформулированы рекомендации по технологии их производства. По сравнению со спеченными фильтроэлементами они характеризуется значительно более высокой гидравлической проницаемостью, но меньшей степенью влагоотделения (табл.8). Поэтому пористый литой алюминий целесообразно использовать в магистральных фильтрах очистки сжатого воздуха.

Таблица 8

Характеристики влагомаслоотделителей (условный проход 30 мм)

Фильтроэлемент	Пропускная способность по воздуху, м^3/мин	Тонкость фильтрации, мкм	Степень влагоотделения, %	Регенерируемость	Цена, руб
Волокнистый полипропилен	0,5	0,3	99	нет	9300
Пеноникель со слоем спеченной бронзы	1	8	98	да	7700
Спеченный никель	1	0,01	99,999	да	9100
Пористый литой алюминий	7,5	40	90	да	6800
Отсутствует	10	-	70	да	4250

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

Основным требованием к пористым проницаемым литым материалам является прогнозируемость и однородность структуры. Существует два пути решения этой проблемы:

- Предварительно сформировать каркас наполнителя спеканием и пропитать его матричным металлом под высоким давлением. После выщелачивания наполнителя структура пористой отливки будет точным зеркальным отражением каркаса. Однако, такой путь чреват существенным увеличением себестоимости за счет усложнения и увеличения длительности технологического процесса, сокращения количества съемов с дорогостоящей металлической оснастки.
- Пропитывать дисперсный наполнитель вакуумным всасыванием, обеспечивая постоянство его структуры и свойств за счет технологических параметров литья. Для решения этой задачи:

1. Разработана модель структуры пористого литого материала, основанная на двух характерных размерах пористого литого материала – максимальном радиусе пор, соответствующем ½ фракции наполнителя, и минимальном радиусе пор, соответствующем радиусу воздушной манжеты, образующейся в месте контакта зерен наполнителя. Радиус воздушной манжеты определяется физико-химическим взаимодействием в системе расплав-наполнитель-воздух. Экспериментально исследованы условия взаимодействия: определены углы смачивания расплавами порообразующих наполнителей, уточнено поверхностное натяжение литейных алюминиевых сплавов. Показана возможность манипулирования минимальным радиусом пор путем регулирования давления пропитки.
2. Теоретически исследовано сцепление твердых частиц вакуумными манжетами. Получены зависимости, позволяющие предсказывать всплытие частиц наполнителя в расплаве, экспериментально подтвержденные в системах Al-NaCl и Pb-NaCl.
3. Исследовано влияние оксидной пленки, образующейся на границе раздела расплав-наполнитель до пропитки, на проникновение расплава в капиллярные зазоры наполнителя. Экспериментально изучена прочность оксидной пленки под нагрузкой, что позволило определить минимальный уровень давления, необходимый для инициации пропитки.
4. Показано, что причиной неоднородности свойств по высоте отливки является изменение давления на фронте расплава от давления разрыва ок-

сидной пленки до давления ресивера. Для расчета давления на фронте расплава решена система уравнений Лейбензона, Дарси и выведенного уравнения давления в поверхностном слое. Относительный размер неоднородного участка прямо пропорционален только соотношению вязкостей расплава и газа. Разработаны технологические решения, предусматривающие стабилизацию давления в пористом объеме до начала пропитки.

5. Выявлено, что причиной образования газовых раковин в композиционных алюминиевых отливках является неравномерный разрыв оксидной пленки с образованием локальных потоков расплава. Предложен способ предупреждения образования газовых раковин.
6. Установлено, что причиной формирования просечек на композиционных отливках является гидравлический удар по окончании пропитки. Разработаны способы предотвращения резкой остановки расплава. Однако полное отсутствие гидравлического удара приводит к появлению другого дефекта – поверхностной непропитки. Избежать как расслоения наполнителя, так и поверхностной непропитки предложено путем управления конечной скоростью расплава при помощи промывников.
7. Изучено влияние технологических факторов на форму и расположение образующейся в композиционной литой заготовке усадочной раковины при изотермической пропитке. Показано, что формирование усадочной раковины в композиционной части отливки, полученной в результате изотермической пропитки, является следствием низкой теплопроводности композита. Для реализации принципа направленного затвердевания предложено использовать неизотермическую пропитку.
8. Экспериментально исследована и промоделирована в программе ProCast (в разработанной модели объемного капилляра) неизотермическая пропитка расплавом чистого алюминия засыпки NaCl. Выявлено наличие критической температуры подогрева наполнителя, выше которой наблюдается резкий рост глубины пропитки. На основе анализа экспериментальных данных разработана методика расчета критической температуры подогрева наполнителя.
9. Исследовано формирование температурного поля в композиционной литой заготовке после неизотермической пропитки. Установлено, что по окончании пропитки в зависимости от условий заливки, фракции наполнителя и размеров отливки градиент температуры расплава может быть либо постоянен, либо формируется 2 зоны:
   - верхняя (у прибыли) с температурой, близкой к температуре заливки расплава;
   - нижняя (донная) с температурой кристаллизации.
10. На основе полученного распределения температур по длине композиционной литой заготовке определен минимальный размер прибыльной части отливки для вывода в нее усадочной раковины. Предложены экономически целесообразные способы интенсификации действия прибыли в композиционных отливках.

11. Экспериментально и теоретически исследовано охлаждение засыпки наполнителя в металлической форме перед заливкой. Разработан размерный ряд припусков на механическую обработку для удаления поверхностного непропитанного слоя на границе форма-отливка и стержень-отливка.
12. Установлено, что избежать коррозии отливки при выщелачивании можно только за счет сквозной фильтрации растворителя, что возможно благодаря наличию зазора между матричным металлом и наполнителем. Предложена и экспериментально подтверждена модель формирования зазора. На основе теоретических закономерностей растворения в потоке разработаны рекомендации по времени выщелачивания наполнителя.
13. На основе созданной модели структуры пористого литого материала и анализа экспериментальных данных разработаны методики расчета:
    - пористости;
    - коэффициента проницаемости;
    - фильтровальной способности;
    - удельной поверхности;
    - механических свойств;
    - спектрального коэффициента звукопоглощения;
    - демпфирующей способности.
14. Разработаны конструкции и технологические параметры изготовления пористых литых:
    - фильтроэлементов, в т.ч. влагомаслоотделителей;
    - глушителей шума, в т.ч. для высоконагруженных пневмоагрегатов;
    - шумопоглощающих пластин.

    Показаны конкурентные преимущества пористых литых изделий перед спеченными.

Экономический эффект от внедрения результатов исследований на промышленных предприятиях составил 1115179 руб в ценах 2005 года.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. Финкельштейн, А.Б. Изучение технологических параметров получения пористых литых изделий / А.Б. Финкельштейн, А.В.Чечулин // Тезисы докладов конференции «Технология и оборудование современного машиностроения» - Уфа: УГАТУ. - 1994.- С.90-91.
2. Фурман, Е.Л. Литье под регулируемым давлением пористых изделий / Е.Л. Фурман, А.Б.Финкельштейн, А.В. Чечулин // Литейное производство. – 1995. - №4-5. - С.50-51.
3. Фурман, Е.Л. Поверхностное натяжение литейных алюминиевых сплавов и смачивание ими неорганических порообразующих наполнителей / Е.Л.Фурман, А.В.Чечулин, А.Б.Финкельштейн, С.П. Казанцев // Расплавы. – 1995. - №3-4. - С.27-31.

4. Фурман, Е.Л. Расчет коэффициентов проводимости пористого литого материала / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн, Мягмаржавын Баттугс // Труды научно-технической конференции «Современные аспекты металлургии получения и обработки металлических материалов» - Екатеринбург: УГТУ. - 1995. - С. 92.
5. Фурман, Е.Л. Температурный режим изготовления пористых алюминиевых отливок / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн, Мягмаржавын Баттугс // В сборнике: «Повышение качества отливок» - Екатеринбург: УГППУ. - 1996. С. 65-66.
6. Фурман, Е.Л. Снижение брака пористого литого алюминия по однородности свойств / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн, Мягмаржавын Баттугс // В сборнике: «Повышение качества отливок» - Екатеринбург: УГППУ. - 1996. С. 66-67.
7. Фурман, Е.Л. Причины и методы предотвращения усадочных дефектов в пористых литых заготовках Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн, А.В.Чечулин, Мягмаржавын Баттугс // В сборнике «Прогрессивные технологические процессы и подготовка кадров для литейного производства» - Екатеринбург: УГППУ. - 1996. - С.148-152.
8. Фурман, Е.Л. Причины брака при получении пористых литых изделий. Процессы литья / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн, А.В.Чечулин // 1996. - №1. С.46-48.
9. Фурман, Е.Л. Пористый литой алюминий / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн // Литейное производство.- 1997. - № 8-9. – С.56-57.
10. Фурман, Е.Л. Пористый литой алюминий. Опыт разработки технологии / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн, С.П. Казанцев // Труды конференции литейщиков России «Совершенствование литейных процессов». - Екатеринбург: УГТУ. - 1997.- С.23-27.
11. Фурман, Е.Л. Определение давления газа на фронте движения расплава / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн, А.Н.Злыгостев // Расплавы. – 1998. - № 2. - С.36-40.
12. Фурман, Е.Л. Использование стержней в композиционных отливках / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн // Материалы международной конференции литейщиков «Совершенствование литейных процессов». - Екатеринбург: УГТУ. - 1999. - С.50-52.
13. Фурман, Е.Л. Формирование поверхности пористой отливки / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн, М.В. Минин // Вестник УГТУ-УПИ № 15(45), Ч.1. - Екатеринбург: 2004. - С.23-25.
14. Финкельштейн, А.Б. Заполняемость форм при производстве композиционных отливок / А.Б.Финкельштейн, И.С. Казанцев // Труды 6 Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного, и кузнечно-штамповочного производства - Барнаул: АлГТУ. - 2004. С.42-43.
15. Финкельштейн, А.Б. Способы регулирования плотности пористых отливок / А.Б.Финкельштейн, И.Е.Фурман //: Сборник тезисов док-

ладов студенческой научной конференции «Студент и научно-технический прогресс» - Екатеринбург: УГТУ-УПИ. - 2004. – С.34.

16. Финкельштейн, А.Б. Финишная обработка пористых отливок / А.Б.Финкельштейн, И.С. Казанцев // Научные труды 5 отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ - Екатеринбург: УГТУ-УПИ. – 2004. - С.17.
17. Финкельштейн, А.Б. Определение теплофизических характеристик порообразующих засыпок / А.Б.Финкельштейн, И.С. Казанцев // Тезисы докладов всероссийской молодежной научно-технической конференции «Проблемы современного машиностроения» - Уфа: УГАТУ. - 2004. - С. 73.
18. Фурман, Е.Л. Исследование прочности оксидной пленки на поверхности расплава алюминия / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн // Труды 11 Российской конференции «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов».- Т.2, Екатеринбург-Челябинск: ЮурГУ. – 2004. - С.213-215.
19. Фурман, Е.Л. Применение пористого литого алюминия / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн // Труды 6 Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике». - СПб: Издательство Политехнического университета – 2004. - С.33-35.
20. Финкельштейн, А.Б. Формирование дефектов поверхности композиционного литья / А.Б.Финкельштейн, И.С.Казанцев, М.В.Минин, С.Н. Злыгостев // Литейное производство. – 2004. - №12, С.16-19.
21. Фурман, Е.Л. Дефекты композиционных отливок, полученных методом пропитки / А.Б.Финкельштейн, И.С.Казанцев // Литейщик России. – 2005. - № 9. - С.32-35.
22. Финкельштейн, А.Б. Особенности технологии изготовления тонкостенных пористых отливок с цельнометаллической частью / А.Б.Финкельштейн, С.П. Казанцев, И.С.Казанцев // Литейщик России, 2005. - № 9. - С.31-32.
23. Финкельштейн, А.Б. Акустические характеристики пористого литого алюминия / А.Б.Финкельштейн, И.С.Казанцев, В.Г. Старков // Безопасность жизнедеятельности. - 2006. - № 4. - С.21-23.
24. Финкельштейн, А.Б. Фильтрующие свойства пористого литого алюминия // А.Б.Финкельштейн, И.С.Казанцев, И.А. Юн // Известия Вузов. Машиностроение. – 2006. - № 8. - С.55-61.
25. Финкельштейн, А.Б. Расчет усадочных зазоров в отливках из композиционных материалов / А.Б.Финкельштейн, И.С.Казанцев, И.А. Юн // Литейное производство. - 2007. - №2. - С.17-19.
26. Фурман, Е.Л. Механические свойства пористого литого алюминия / Е.Л.Фурман, А.Б.Финкельштейн, Новожилов Н.Ю. // Цветные металлы, 2007. - №4. - С. 120-122.

27. Фурман, Е.Л. Сцепление твердых частиц газовыми манжетами в расплаве / Е.Л. Фурман, А.Б.Финкельштейн, Н.Ю. Новожилов, И.С. Казанцев // Расплавы. - 2007. - №6. - С.80-85.
28. Фурман, Е.Л. О роли гидроудара при изготовлении композиционных отливок / Е.Л. Фурман, А.Б.Финкельштейн, С.Н.Злыгостев // Литейное производство. – 2008. - №12. - С.12-14.
29. Финкельштейн, А.Б. Структурообразование литых пористых материалов / А.Б.Финкельштейн, И.С. Казанцев, Д.А.Пельц // Сборник трудов 5 международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» Т.12. - СПб: Издательство Политехнического университета. - 2008. - С.310-312.
30. Финкельштейн, А.Б. Формирование усадочных дефектов в композиционных литых заготовках / А.Б.Финкельштейн, С.Н.Злыгостев И.С. Казанцев // Литейное производство. - 2009. - №8. С.29-34.
31. Финкельштейн, А.Б. Неизотермическая пропитка при получении композиционных отливок / А.Б.Финкельштейн, И.С. Казанцев // Труды 9 съезда литейщиков России. – Уфа: УГАТУ. - 2009. - С.133-134.
32. Пат. № 2 256 530 Российская Федерация, (51) МПК 7 В 22 D 25/00. Способ получения пористых отливок. Фурман Е.Л., Финкельштейн А.Б., Фурман И.Е. № 2004100730/02; заявл.06.01.2004, опубл. 20.07.2005. Бюл. №20.
33. Пат. № 2 299 112 Российская Федерация, (51) МПК 7 В 22 D 25/00. Способ получения пористых отливок. Фурман Е.Л., Финкельштейн А.Б. № 2005139743/02; заявл.19.12.2005, опубл. 20.05.2007. Бюл. №14.

Ризография НИЧ УГТУ-УПИ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19