

ЭК

На правах рукописи

Знаменский

Знаменский Леонид Геннадьевич

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
АКТИВАЦИИ ФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ МАТЕРИАЛОВ
И ПРОЦЕССОВ В ТОЧНОМ ЛИТЬЕ

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ч

Челябинск
2004

Работа выполнена на кафедре «Литейное производство» Южно-Уральского государственного университета.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Кулаков Б.А.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Жуковский С.С.;
- доктор технических наук, профессор Мысик Р.К.;
- доктор технических наук, профессор Афонаскин А.В.

Ведущее предприятие – ЗАО «Уральская бронза» (г. Челябинск).

Защита диссертации состоится 23 июня 2004 г., в 14 часов, в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д212.298.06 в Южно-Уральском государственном университете.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет. Тел. (3512)67-91-23, факс (3512)65-59-50.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан «_____» 2004 года.

Ученый секретарь совета
доктор технических наук,
профессор

Б.В. Ерофеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Разработка новых видов отечественной техники, конкурентоспособной на мировом рынке в областях машиностроения, приборостроения и металлургии, а также создание уникальных образцов художественных изделий объективно поднимают проблему перевода на качественно новый уровень точного литья сложнопрофильных, тонкорельефных отливок.

Их специфика состоит в развитой поверхности, большом объеме сложных по конфигурации полостей, тонкостенности. Поэтому изготовление таких отливок требует высокой точности и прочности, улучшенной выбиваемости форм и стержней, повышенных литейных и физико-механических свойств сплавов.

Принципиально новым направлением в решении указанной проблемы является разработка способов формообразования и подготовки расплавов, основанных на активации физическими полями материалов и процессов в точном литье. Учитывая энергетические характеристики современных генераторов таких полей, появляется возможность целенаправленного воздействия и управления структурой и свойствами формовочных смесей и сплавов.

В отечественной и зарубежной научно-технической литературе информация об использовании физических воздействий в точном литье является явно недостаточной и подчас противоречивой.

В связи с этим представляется актуальной разработка теоретических и технологических основ обработки формовочных материалов, смесей и металлических расплавов физическими полями, что позволяет управлять процессами изготовления сложнопрофильных, тонкорельефных отливок. При этом проблема повышения их качества носит комплексный характер. Она включает разработку новых составов смесей и способов изготовления керамических форм, стержней и отливок с улучшенными физико-механическими характеристиками на основе установленных сложных механизмов воздействия электроимпульсных и ультразвуковых полей на структуру и свойства кремнеземистых коллоидных растворов, процессы гидролиза и поликонденсации этилсиликата, электродиализа жидкого стекла, фильтрации в гелеобразующих системах, дегазации супспензий на гипсовом связующем, легирования и модификации сплавов, а также создание соответствующих физико-математических моделей и их программную реализацию на ЭВМ.

Основные разделы работы выполнены в соответствие с грантами по решению актуальных проблем в области процессов литья, а также по заданию Министерства образования РФ в области фундаментальных исследований в металлургии и машиностроении в период 1994...2003 гг

Цель работы. Разработка теоретических и технологических основ активации мощными наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) и комбинированными физическими

использованием ультразвука, вакуума и барботажа процессов формообразования и приготовления расплавов в точном литье, создание эффективных методов управления соответствующими нанотехнологиями.

Поставленная цель реализовывалась путем проведения комплексных исследований по ряду направлений, в ходе которых необходимо было решить следующие задачи:

- изучить закономерности воздействия НЭМИ на структуру и свойства связующих материалов (гидролизованные растворы этилсиликата, жидкое стекло) в точном литье, а также на процессы их подготовки;
- исследовать кинетику процесса электродиализа жидкого стекла в электромагнитно-импульсном поле, теоретически и экспериментально обосновать процессы электроимпульсно-диализной активации подготовки высокомодульного жидкостекольного связующего для точного литья;
- установить механизмы фильтрационных процессов в гелеобразующих системах с активированными НЭМИ пропитывающими растворами, создать методики расчета оптимальных технологических параметров и режимов электроимпульсно-фильтрационного формообразования;
- провести кинетический анализ затвердевания суспензий системы «высокопрочный гипс – металлофосфатные растворы» и обеспечить комплекс реологических свойств гипсо-кремнеземистых смесей, необходимых для эффективного воздействия мощного ультразвука в режиме развитой акустической кавитации;
- теоретически и экспериментально обосновать комбинированные физические способы регулирования процессов формообразования из гипсо-кремнеземистых смесей с использованием ультразвука, вакуума и барботажа;
- разработать на основе исследований, предложенных математических моделей и механизмов активации физическими полями материалов и процессов эффективные составы и способы подготовки кремнеземисто-коллоидных связующих растворов и смесей, электроимпульсные и ультразвуковые технологии изготовления керамических форм и стержней с улучшенным комплексом свойств;
- изучить закономерности воздействия электромагнитно-импульсных полей на структуру и свойства металлических расплавов, в частности алюминиевых, провести термодинамический и кинетический анализы процессов взаимодействия в системе «алюминий – галогениды тугоплавких металлов» и оценить влияние на них НЭМИ;
- создать эффективные электроимпульсные технологии приготовления мелкокристаллических модифицирующих лигатур и обработки алюминиевых расплавов для получения отливок с заданными физико-механическими характеристиками;
- изучить влияние на качество сложнопрофильных, тонкорелефных отливок разработанных технологий формообразования и приготовления расплавов, освоить их в точном литье из черных и цветных сплавов.

Научная новизна. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена совокупность научных положений, позволяющих эффективно и целенаправленно воздействовать НЭМИ и комбинированными физическими методами с использованием ультразвука, вакуума и барботажа на процессы формообразования и приготовления расплавов в точном литье. В том числе:

- получены новые экспериментальные данные по влиянию НЭМИ на структуру и свойства кремнеземисто-коллоидных связующих материалов и алюминиевых сплавов в жидком и твердом состояниях;
- оптическими и кондуктометрическими методами, инфракрасной спектроскопией, pH-метрией установлен электрон-радикальный механизм электроимпульсной активации процессов гидролиза и поликонденсации гидролизованных растворов этилсиликата (ГРЭТС);
- созданы теоретические основы электродиализа натриевых кремнеземисто-коллоидных растворов в поле НЭМИ, разработаны и реализованы в программные средства ЭВМ математическая модель и методика расчета параметров электроимпульсно-диализной подготовки высокомодульного жидкостекольного связующего для процессов точного литья;
- установлены закономерности активации процесса гидролиза этилсиликата без органических растворителей в поле НЭМИ, выявлено их катализитическое влияние на поликонденсацию молекул гидролизованного этилсиликата, найдены эффективные методы регулирования ее степени модифицированием связующих солями алюминия, теоретически и экспериментально обоснованы температурно-временные режимы муллитообразования при прокалке их гелей в условиях электроимпульсно-химической подготовки ГРЭТС;
- сформулированы основополагающие принципы электроимпульсно-фильтрационного формообразования, на основе физической модели уложенных сфер, аналитически получены зависимости, характеризующие кинетику фильтрации в гелеобразующих системах, активированных НЭМИ, создана методика оценки качества плакирования зернистых наполнителей гелеобразователями;
- методами инфракрасной спектроскопии, рентгенофазового анализа, растровой электронной микроскопии выяснены механизмы фильтрационного формообразования, созданы методики и программы расчетов на ЭВМ оптимальных параметров;
- на основании положений теории двойного электрического слоя, термодинамического и кинетического анализов обоснованы процессы, протекающие в системе «высокопрочный гипс – металлофосфатные растворы», установлены закономерности влияния на структуру и свойства алюмохромфосфатного связующего (АХФС) и алюмоборфосфатного концентрата (АБФК) ультразвука в режиме развитой кавитации;
- методами дилатометрии, дериватографии и рентгенофазового анализа выяснены высокотемпературные процессы, происходящие при прокалке гипсо-кремнеземистых форм и стержней с впервые примененными в их

- составе циклонной пылью шамотного производства (ЦПШП) и водными растворами АХФС и АБФК, обработанными ультразвуком;
- разработаны математическая модель, методики и программа расчетов на ЭВМ кинетики вакуумно-ультразвуковой дегазации самотвердеющих суспензий на гипсовом связующем, а также установлены закономерности их барботажно-ультразвуковой обработки для формирования равномерной высокопористой структуры литьевых форм и стержней в литье по вытяжным резиновым моделям;
 - созданы теоретические основы воздействия НЭМИ на структуру и свойства алюминиевых литьевых сплавов, процессы их модифицирования и легирования тугоплавкими металлами, проведены термодинамический и кинетический анализ взаимодействий в системе «расплавленный алюминий – галогениды Mo, Ti, Zr» в электромагнитно-импульсном поле.

Практическая ценность работы. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые технологические процессы подготовки материалов, формообразования и приготовления расплавов в точном литье, основанные на активации НЭМИ и комбинированными физическими воздействиями ультразвука, вакуума и барботажа. В том числе:

- разработаны эффективные способы подготовки под действием НЭМИ гидролизованных растворов этилсиликата и жидкого стекла с повышенной смачивающей и адгезионной способностью, за счет эффекта электроимпульсного «разжигания» связующих достигнуто увеличение степени наполнения суспензий и повышение в 1,5...2,0 раза прочности керамических форм и стержней;
- обработкой в поле НЭМИ интенсифицирован процесс гидролиза ЭТС без органических растворителей, созданы надежные методы регулирования степени поликонденсации активированных ГРЭТС, обеспечивающие оптимальную живучесть связующего;
- повышена в 2,0...3,0 раза скорость электродиализа жидкого стекла под действием НЭМИ, что позволило при постоянном количестве SiO_2 в связующем ускоренно снижать содержание в нем ионов натрия по мембранный технологии и за счет электроимпульсно-диализной подготовки высокомодульного жидкостекольного связующего обеспечить увеличение на 60...80% термопрочности керамических форм;
- созданы электроимпульсно-химические способы модифицирования ГРЭТС солями алюминия, упрочняющие керамические формы в горячем состоянии на 30...40%;
- разработана технология фильтрационного формообразования с активированными НЭМИ пропитывающими растворами, в результате чего достигнуты высокие физико-механические свойства керамических стержней в точном литье, а также их саморазупрочнение и высыпаемость из глухих полостей отливок из черных сплавов;
- предложены новые составы формовочных гипсо-кремнеземистых смесей с использованием в качестве затворителей металлофосфатных растворов.

- разработаны способы их обработки ультразвуком в режиме развитой кавитации и вакуумно-ультразвуковой дегазации соответствующих сусpenзий в литье по выплавляемым моделям;
- разработана барботажно-ультразвуковая технология изготовления форм и стержней на гипсовом связующем, позволяющая сформировать их равномерно-высокопористую структуру для точного литья по вытяжным резиновым моделям;
 - созданы технологические основы обработки НЭМИ литейных алюминиевых сплавов, способы электроимпульсного приготовления мелкокристаллических лигатур системы «алюминий – тугоплавкий металл (Mo, Ti, Zr)», обладающих комплексным модифицирующим и рафинирующим воздействием.

При использовании разработанных технологий в производстве удалось более чем на 30% уменьшить толщины стенок художественных отливок, значительно улучшить качество тонкорельефной поверхности, в 2,0...3,0 раза снизить себестоимость литья по выплавляемым моделям из черных и цветных сплавов, повысить экологическую безопасность процессов точного литья.

Реализация работы. Разработанные технологии прошли опытно-промышленные испытания и освоены на Каслинском машиностроительном заводе, Челябинских ЗАО «Уральская бронза» и производственном предприятии «Престиж, стабильность, профессионализм (ПСП)» с суммарным экономическим эффектом 15 млн. руб. в год.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены и обсуждены на тридцати двух всероссийских и международных научно-технических конференциях (НТК). В том числе на НТК «Новые формовочные материалы в литейном производстве», Челябинск, 1989; на Всероссийской НТК «Прогрессивные технологии изготовления форм и стержней для производства отливок», Челябинск, 1990; на втором съезде литейщиков России, Ульяновск, 1995; на Международной НТК «Новые ресурсосберегающие технологии и материалы», Челябинск, 1996; на Международной НТК «Высокотемпературная капиллярность», Польша, Krakow, 1997; на третьем съезде литейщиков России, Владимир, 1997; на Всероссийской НТК «Новые технологические процессы в литейном производстве», Омск, 1997; на Международных НТК «Прогрессивные технологические процессы в машиностроении», Челябинск, 1997, 1998, 1999; на Международной НТК «Совершенствование литейных процессов», Екатеринбург, 1999; на Всероссийской НТК «Теория и технология литейных сплавов», Владимир, 1999; на IV съезде литейщиков России, Москва, 1999; на I Международной НТК «Металлургия и образование», Екатеринбург, 2000; на VI съезде литейщиков России, Екатеринбург, 2003; на Международной НТК «Современные проблемы атомной науки и техники», Снежинск, 2003 и др. Результаты работы неоднократно экспонировались на отечественных и международных выставках, удостоены почетных дипломов

торгово-промышленной палаты по итогам конкурсов «Инновация – 2002» и «Инновация – 2003».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 130 печатных работ, в том числе 70 в центральных изданиях, 2 монографии, получено 20 патентов на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка литературы, включающем 362 наименования, 9 приложений, содержит 260 страниц машинописного текста, 87 таблиц, 154 рисунка. В приложении представлены акты внедрения и технологические инструкции по применению в производстве точного литья разработанных технологий формообразования и приготовления расплавов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Одним из актуальных направлений развития современного литейного производства является повышение качества и экономической эффективности изготовления точнолитых заготовок, отличающихся сложнопрофильностью и тонкорельефностью. Их специфика определяется тем, что отношение площади рабочей поверхности форм к их объему значительно превышает аналогичную величину в производстве других видов отливок. Развитая поверхность заготовок способствует увеличению «трения» расплава о стенки форм, что отрицательно сказывается на условиях заполнения и воспроизведения их рельефа, а также обуславливает большую скорость теплоотдачи в системе «металл–форма». Учитывая конструктивные особенности и значимость для современного художественного литья, машиностроения и металлургии таких отливок, к формам, стержням и сплавам для их изготовления предъявляются повышенные требования по физико-механическим характеристикам.

Современный этап развития соответствующих технологий основан на применении различных видов физико-химической активации процессов формообразования и приготовления расплавов. Научно-технический прогресс приводит к непрерывному совершенствованию техники генерирования физических полей с качественно новыми характеристиками, позволяющими эффективно воздействовать на тонкую структуру веществ. В этой связи, представляет теоретический и практический интерес изучение закономерностей влияния наносекундных электромагнитных импульсов и комбинированных воздействий с использованием ультразвука, вакуума и барботажа на процессы формообразования и приготовления расплавов в точном литье. Это позволит управлять структурой и свойствами формовочных материалов, смесей и сплавов, повысить качество изготовления сложнопрофильных и тонкорельефных отливок и поэтому представляется актуальной проблемой в теории и технологии литейных процессов. Однако, из-за отсутствия до настоящего времени системного подхода, невыясненных механизмов воздействия НЭМИ, ультразвуковых и

комбинированных полей на структуру и свойства формовочных материалов и сплавов, фильтрационные процессы в гелеобразующих системах необходимы их комплексные теоретические и экспериментальные исследования для повышения качества и экономической эффективности производства сложнопрофильных, тонкорельефных отливок. По результатам аналитического обзора в *первой главе* сформулированы цель и задачи работы.

Во *второй главе* выявлены закономерности воздействия НЭМИ на структуру и свойства гидролизованного раствора этилсиликата (ГРЭТС) и жидкого стекла (ЖС), процессы их подготовки для точного литья. Электроимпульсная обработка готовых ГРЭТС обуславливает экстремальный характер изменения вязкости и смачивающей способности связующего. Методами кондуктометрии, инфракрасной спектроскопии и рефрактометрии выявлено, что это связано с ионизацией и диспергированием компонентов связующего на первоначальном этапе обработки НЭМИ и коагуляцией коллоидной системы при дальнейшем электроимпульсном воздействии. При этом оптимальный диапазон значений параметров НЭМИ (удельная мощность – $N = 550...650 \text{ МВт}/\text{м}^3$, частота следования импульсов – $f = 800...1000 \text{ Гц}$, продолжительность обработки – $\tau = 5...10 \text{ мин}$) обеспечивает уменьшение вязкости ГРЭТС на 15...20 % и краевого угла смачивания в 1,3...1,4 раза, увеличение прочности керамических форм в 1,8...2,0 раза.

Наибольший эффект в синтезе связующих с заранее заданным комплексом свойств может быть достигнут при воздействии НЭМИ непосредственно в ходе гидролиза ЭТС. Механизм его прохождения в этом случае связан с импульсным радиолизом воды, который обуславливает появление в гидролизате атомов Н и радикалов ОН. Являясь химически активными частицами, водород активно отщепляет этоксильные группы от атома кремния с образованием этилового спирта, а ОН кинетически более легко присоединяется к полученному макрорадикалу $\equiv\text{Si}\bullet$. В результате в 2,0...2,5 раза ускоряется процесс гидролиза ЭТС без органических растворителей. Методом инфракрасной спектроскопии на спектрофотометре «SPECORD-75JR» (рис. 1) установлено, что при воздействии НЭМИ на связующее происходит увеличение силанольных связей $\equiv\text{Si}-\text{OH}$, характеризующихся частотами 1150 и 940 см^{-1} , и уменьшение связей Si–O в группах $\equiv\text{Si}-\text{OC}_2\text{H}_5$, проявляющееся в снижении интенсивности полос поглощения при 1170 и 970 см^{-1} . При этом наблюдается рост интенсивности полос поглощения при частотах 784 и 1070 см^{-1} , соответствующих деформационным и валентным колебаниям атомов в силоксанах $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$.

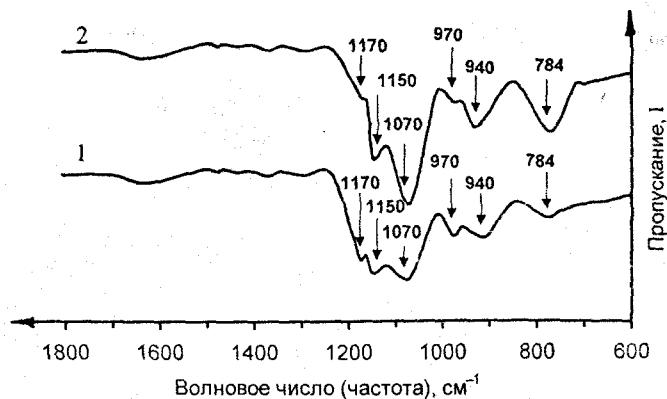


Рис. 1. ИК-спектры поглощения ГРЭТС:
1 – исходный ГРЭТС; 2 – ГРЭТС, обработанный НЭМИ

Таким образом, анализ процессов на уровне химических связей в связующих растворах показывает, что электроимпульсная обработка интенсифицирует не только гидролиз, но и поликонденсационные процессы, приводящие при последующей выдержке ГРЭТС к агрегации его коллоидных частиц. Поэтому разработан способ регулирования поликонденсации в активированных ГРЭТС. Он состоит в непрерывном измерении удельного электросопротивления системы и введением 3...5 %-ных водных растворов высокомолекулярных ПАВ (поливиниловый спирт или карбоксиметилцеллюлоза натриевая) при определенном отношении удельных электросопротивлений гидролизата и исходного этилсиликата (ρ_1/ρ_i): $(5\dots7)\cdot10^{-5}$ для ЭТС-40 и $(2\dots4)\cdot10^{-5}$ для ЭТС-32. В этом случае на микроуровне между гидроксильными группами поверхности-активного вещества и кремнезёмного полимера возникает водородная связь. На коллоидных частицах ГРЭТС образуется мономолекулярный адсорбированный слой, препятствующий их агрегации. Использование разработанного способа позволяет повысить живучесть связующих и суспензий в 2,5...3,5 раза, снизить их вязкость на 30...35 %.

Повышение термопрочности керамических форм может быть достигнуто проведением гидролиза ЭТС водными растворами солей алюминия ($AlCl_3\cdot6H_2O$ и $Al(NO_3)_3\cdot9H_2O$) при непрерывном воздействии НЭМИ. Указанная электроимпульсная обработка обеспечивает диспергирование коллоидных частиц ГРЭТС и приводит при последующем нагреве связующего с солями алюминия к ускорению твердофазных реакций между колloidами SiO_2 и Al_2O_3 и к снижению температуры муллитаобразования. Методом ИК-спектроскопии, дериватографическим и рентгенофазовым (рис.2) анализами установлено, что температура кристаллизации муллита в гелях, полученных указанным способом, понижается до $850\dots900^{\circ}C$. В литье по выплавляемым моделям эти значения соответствуют температурам

прокалки керамических форм. Поэтому в их фазовом составе появляется муллит, обеспечивающий снижение КТЛР, повышение точности и термопрочности при формообразовании из керамических материалов.

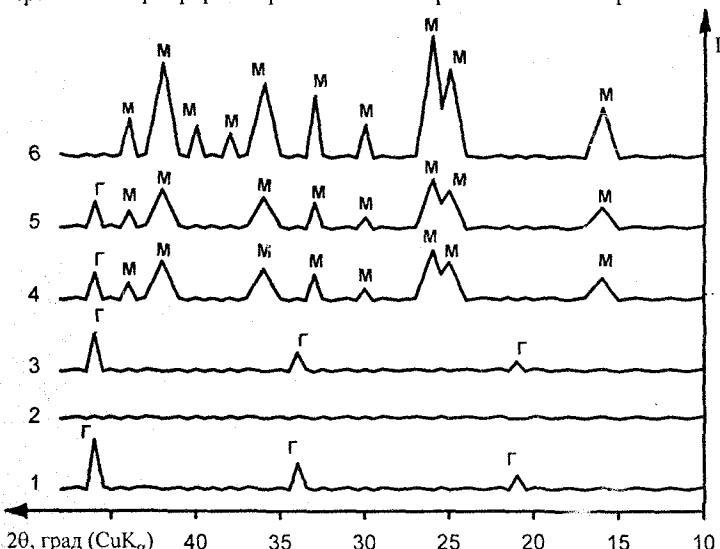


Рис. 2. Дифрактограммы прокалённых в течение 4 ч гелей ГРЭТС:

1 – $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 900 $^{\circ}\text{C}$; 2 – гель исходного ГРЭТС, 900 $^{\circ}\text{C}$;

3 – гель ГРЭТС с $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 900 $^{\circ}\text{C}$;

4 – гель ГРЭТС с $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, полученного при воздействии НЭМИ, 900 $^{\circ}\text{C}$;

5 – гель ГРЭТС с $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 1100 $^{\circ}\text{C}$;

6 – гель ГРЭТС с $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, полученного при воздействии НЭМИ, 1100 $^{\circ}\text{C}$;

M – муллит, Г – $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан электроимпульсно-химический способ подготовки ЭТС связующих с улучшенным комплексом свойств. Он состоит в проведении гидролиза этилсиликата водными растворами солей алюминия ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (20...25 %) или $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (25...30 %)) при воздействии НЭМИ с разбавлением гидролизата до необходимого содержания SiO_2 водными растворами высокомолекулярных ПАВ (ПВС и КМЦ-Н) при достижении отношения $\rho_{\text{г}}/\rho_{\text{и}} = (0,8...1,4) \times 10^{-5}$ для ЭТС-40 и $\rho_{\text{г}}/\rho_{\text{и}} = (0,4...1,0) \times 10^{-5}$ для ЭТС-32. Использование разработанного электроимпульсно-химического способа подготовки ГРЭТС без органических растворителей в 4...5 раз повышает живучесть супензии, увеличивает в 2,0...2,5 раза прочность керамических форм, в том числе при высоких температурах.

Одним из эффективных направлений повышения точности и прочности керамических форм в «горячем» состоянии является использование высокомодульного жидкостекольного связующего. Его высокоскоростная и экономичная подготовка может быть осуществлена по принципу симбиоза электроимпульсной и мембранных технологий. В этой связи зафиксировано явление ускорения в поле НЭМИ электродиализа коллоидных растворов ЖС с сохранением их агрегативной устойчивости (табл.1).

Таблица 1
Влияние НЭМИ на процесс электродиализа и свойства ЖС

Показатели	Электродиализ ЖС при воздействии НЭМИ в течение,						
	0	30	60	120	180	600	1500
1. Содержание Na_2O , %	11,0	9,8 (10,8)	8,9 (10,7)	7,1 (10,5)	5,1 (10,4)	2,8 (9,7)	0,3 (9,0)
2. Содержание SiO_2 , %	30,8	30,8 (30,8)	30,8 (30,8)	30,8 (30,8)	30,8 (30,8)	30,8 (30,8)	30,8 (30,8)
3. Скорость электродиализа, %/ч	0	2,4 (0,4)	2,1 (0,3)	2,0 (0,25)	2,0 (0,2)	0,82 (0,13)	0,42 (0,08)
3. Кинематическая вязкость ЖС, $\nu \times 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	5,0	2,0 (5,2)	1,9 (5,3)	1,9 (5,4)	1,9 (5,4)	2,2 (5,4)	2,3 (5,5)
4. Удельная электропроводность, σ , $\text{См}/\text{м}$	0,527	1,265 (0,505)	1,325 (0,500)	1,330 (0,492)	1,330 (0,490)	1,141 (0,485)	1,140 (0,480)
5. Краевой угол смачивания пластины из модельного состава, $\theta_{m,c}$, град.	90	63 (90)	60 (92)	57 (93)	55 (95)	57 (98)	58 (99)
6. Показатель преломления, ед.	1,396	1,368 (1,396)	1,366 (1,422)	1,357 (1,448)	1,353 (1,454)	1,357 (1,473)	1,358 (1,505)
7. Водородный показатель, pH, ед.	11,3	10,2 (11,0)	9,8 (10,9)	9,5 (10,8)	9,2 (10,7)	8,5 (10,6)	8,3 (10,6)
8. Живучесть, сут.				Не ограничена			
		(160)	(140)	(100)	(74)	(50)	(25)

Примечание. В скобках указаны значения параметров при электродиализе без НЭМИ.

Указанная электрофизическая обработка вызывает разрыв связей Na^+ с кремнекислородным тетраэдром и способствует увеличению в интермицелярной жидкости коллоидного раствора ионов натрия. Это интенсифицирует процесс их «коткачки» через полупроницаемую мембрану под действием тока электродиализа. При этом на поверхности мицелл активированного ЖС образуется адсорбционно-сольватный слой из продуктов радиолиза воды, возникающих в поле НЭМИ. Этот слой создает электрохимический барьер агрегации коллоидных частиц. В результате обеспечивается получение высокомодульного ЖС с практически

неограниченной живучестью. Протекание процесса электродиализа ЖС в поле НЭМИ сопровождается структурными превращениями, вызывающими сложный характер изменения удельной проводимости рассматриваемого коллоидного раствора (рис.3). Это во-многом определяет существенные расхождения экспериментальных кинетических данных с расчетными по классической теории электродиализа растворов. «Возмущающим» фактором в этом случае является воздействие НЭМИ.

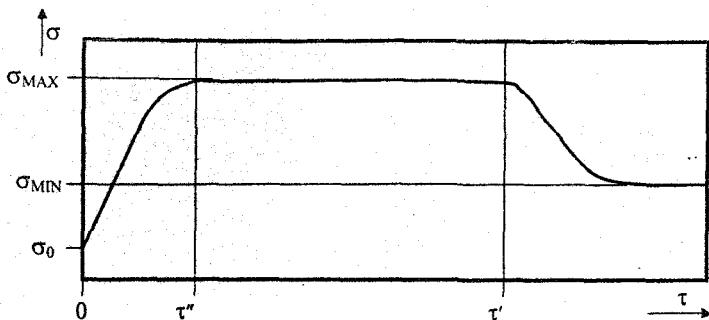


Рис. 3. Общий вид зависимости $\sigma = f(\tau)$ при электродиализе ЖС с НЭМИ

На приведённом графике четко выделяются три области:

- возрастание удельной электропроводности от начального значения (σ_0) до максимального (σ_{MAX}), обусловленное диспергированием коллоидных частиц с образованием Na^+ и ионизацией компонентов раствора при воздействии НЭМИ ($\tau < \tau''$);
- постоянное значение функции, соответствующее величине «насыщения» (σ_{MAX}), когда скорость удаления ионов из раствора равна скорости их появления под действием НЭМИ ($\tau = \tau'' \dots \tau'$);
- падение удельной электропроводности от максимального значения до минимального (σ_{MIN}), связанное с уменьшением носителей зарядов в растворе и некотором «росте» частиц при электродиализе при воздействии НЭМИ ($\tau > \tau'$).

Для математического описания изменения удельной проводимости коллоидных растворов ЖС в процессе их электродиализа в поле НЭМИ получена следующая система уравнений $\sigma=f(\tau)$:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma = \sigma_{\text{MAX}} + (\sigma_0 - \sigma_{\text{MAX}}) e^{-\alpha(1-\beta)\tau}, & \tau \leq \tau' \\ \sigma = \sigma_{\text{MIN}} + (\sigma_{\text{MAX}} - \sigma_{\text{MIN}}) e^{-\alpha\beta(\tau-\tau')} (1 + \alpha\beta(\tau - \tau')), & \tau \geq \tau' \end{array} \right. \quad (1)$$

где σ_{MAX} и σ_{MIN} – соответственно максимально и минимально достижимые удельные электропроводности ЖС при электродиализе с НЭМИ, См/м; σ_0 – удельная электропроводность исходного раствора ЖС, См/м; τ – продолжительность электродиализа, с; τ' – время до начала падения

удельной электропроводности при электродиализе с НЭМИ, с; α – коэффициент интенсивности изменения удельной электропроводности ЖС в зависимости от параметров НЭМИ (мощность и частота), с⁻¹; β – коэффициент, учитывающий электрические параметры электродиализной установки (сила тока и доля полезной площади мембранны).

С учетом экспериментально полученной зависимости удельной проводимости от времени $\sigma=f(t)$ создана математическая модель кинетики электроимпульсно-мембранной обработки ЖС:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_K = C_H - \frac{I_0 \eta k}{\sigma_0 n F V} \cdot \frac{S_{\text{ЭЛ}}}{S_M} \left(\sigma_{\text{МАХ}} t - \frac{(\sigma_0 - \sigma_{\text{МАХ}})}{\alpha(1-\beta)} (e^{-\alpha(1-\beta)t} - 1) \right), \quad t \leq t' \\ C_K = \left(C_H - \frac{I_0 \eta k}{\sigma_0 n F V} \cdot \frac{S_{\text{ЭЛ}}}{S_M} \left(\sigma_{\text{МАХ}} t' - \frac{(\sigma_0 - \sigma_{\text{МАХ}})}{\alpha(1-\beta)} (e^{-\alpha(1-\beta)t'} - 1) \right) \right) \times \\ \times e^{-\alpha\beta\gamma(\tau-t')} (1 + \alpha\beta\gamma(\tau-t')), \quad t \geq t' \\ t' = \frac{10}{\alpha\beta}; \quad \beta = \frac{I_0}{I_{\text{ПРЕД}}} \cdot \frac{S_{\text{ЭЛ}}}{S_M}; \quad \gamma = \frac{\sigma_{\text{МАХ}} - \sigma_{\text{МН}}}{\sigma_{\text{МАХ}}}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где C_K – молярная концентрация ионов натрия в ЖС после электродиализа при воздействии НЭМИ, моль/м³; C_H – молярная концентрация ионов натрия в исходном ЖС, моль/м³; t – продолжительность электродиализа, с; I_0 – сила тока на электродах при электродиализе, А; η – коэффициент выхода по току для ионов Na^+ ; k – количество парных ячеек в электродиализаторе; n – заряд иона натрия; F – число Фарадея, Кл/моль; V – объём ЖС, подвергнутого электродиализу, м³; $S_{\text{ЭЛ}}$ – площадь одного электрода, м²; S_M – рабочая площадь мембранны, м²; $I_{\text{ПРЕД}}$ – предельная плотность тока, определяемая материалом мембранны, А; γ – коэффициент, учитывающий природу связующего.

Модель экспериментально подтверждена и положена в основу разработанной методики расчета оптимальных технологических параметров, реализованной в компьютерной программе «EID». Она позволяет в зависимости от различных условий производства при фиксированных параметрах НЭМИ выбрать величину тока электродиализа, рассчитать напряжение, подаваемое на электроды, и оптимальное время подготовки ЖС заданного модуля и свойств.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать электроимпульсно-мембранную технологию приготовления высокомодульного ЖС для точного литья. Ее выгодно отличает экологическая «чистота», высокая производительность, относительно низкая энергоемкость. При оптимальных параметрах НЭМИ, определяемых в соответствие с созданными моделью и методикой расчета, удается за 1...3 часа добиться модуля ЖС в пределах 5...8 ед. Использование такого связующего в литье по выплавляемым моделям обеспечивает увеличение в 2,0...2,5 раза прочности керамических форм в горячем

состоянии, исключает пригарообразование и улучшает выбиваемость точных отливок из черных сплавов.

Принципиально новым направлением в решении проблемы повышения качества изготовления отливок является разработка технологий фильтрационного формообразования, основанных на активации наносекундными электромагнитными импульсами материалов и процессов в точном литье.

В третьей главе представлены теоретические основы электроимпульсно-фильтрационного формообразования. Оптимальными свойствами для условий этого нового вида формообразования обладают фильтрационно-гелеобразующие системы: «ГРЭТС – наполнитель, плакированный смесью ЖС и феррохромового шлака (ФХШ)»; «ЖС – наполнитель, плакированный хлоридом алюминия». Фильтрация в этих системах обеспечивает ускоренное получение в пористом теле коагуляционных структур, обеспечивающих адгезионное “сцепление” частиц наполнителя и повышение точности и термопрочности изготавливаемых стержней и форм в точном литье. Обработка пропитывающих растворов НЭМИ по определенным режимам ($N_1 = 300...400 \text{ МВт}/\text{м}^3$, $\tau_{\text{обр1}} = 2...6 \text{ мин}$ для ГРЭТС и $N_2 = 400...500 \text{ МВт}/\text{м}^3$, $\tau_{\text{обр2}} = 15...20 \text{ мин}$ для ЖС) вызывает снижение более чем в 1,5 раза их кинематической вязкости и повышение в 2,0...2,5 раза глубины пропитки в рассматриваемых фильтрационно-гелеобразующих системах.

Методами pH-метрии, рентгенофазового анализа и инфракрасной спектроскопии установлены механизмы фильтрационного формообразования указанных гелеобразующих систем. В частности, применительно к ЭТС связующему формированию прочности смеси обусловлено массопереносом щелочных продуктов реакции из плакирующего слоя наполнителя в гидролизованный раствор этилсиликата, вызывающим повышение его pH до значения 5...6 и огеливание в процессе фильтрации через плакированный наполнитель. Особенностью фильтрационного формообразования с использованием жидкостекольного связующего является выделение геля кремниевых кислот в зонах контакта между частицами плакированного наполнителя вследствие взаимодействия ЖС с хлоридом алюминия.

В процессе продвижения ЖС в межзерновом пространстве в результате взаимодействия воды связующего раствора и плакированного зернистого материала происходит гидролиз AlCl_3 с образованием кислой среды. Продукты реакций удаляются из контактной зоны частиц из-за массопереноса, обусловленного принудительной фильтрацией связующего через плакированный наполнитель. В результате чего pH фильтрующегося ЖС уменьшается до значений 8...9 и связующее переходит в область агрегативной неустойчивости. Происходит выделение геля кремниевой кислоты, обеспечивающего формообразование, и гидратированного ортосиликата алюминия.

Создана методика изучения кинетики фильтрации гелеобразующих растворов через плакированные наполнители, характеризующая пропитку

пористого тела жидкостью и степень ее отверждения. В частности, совместным использованием методов фиксирования уровня перемещения фронта пропитывающей жидкости и удельного сопротивления фильтрационно-гелеобразующих систем через равные промежутки времени, установлено ускорение фильтрации ГРЭС и ЖС, активированных НЭМИ. Это явление теоретически может быть обосновано сообщением атомам растворов избыточной энергии, приводящей к частичному разрушению кластеров жидкости и возникновению эффекта ее «разжижения», что существенно активизирует фильтрационные процессы в режиме вязкостного течения для рассматриваемых гелеобразующих систем. При этом, главными факторами являются удельная мощность и продолжительность воздействия НЭМИ.

Анализом кинетики фильтрационных процессов определен оптимальный для изготовления литейных стержней и форм метод фильтрации гелеобразующих растворов, основанный на том, что градиент давления создается разряжением в оснастке $(0,3...0,7) \times 10^5$ Па или принудительной подачей связующих под избыточным давлением $(2...3) \times 10^5$ Па. Продолжительность гелеобразования при фильтрации находится в пределах 10..30с.

«Возмущающими» факторами, обеспечивающими отклонение экспериментальных данных от результатов расчета по уравнениям классической теории фильтрации, являются плакирование частиц наполнителя веществами, вызывающими отверждение прорвигающегося фронта гелеобразующего раствора и изменение его физико-химических свойств под действием НЭМИ. На первом этапе вязкость пропитывающего раствора при увеличении продолжительности его обработки НЭМИ уменьшается и характеризуется показательной функцией

$$\frac{\eta_{\text{НЭМИ}}}{\eta_0} = e^{-\tau_{\text{обр.НЭМИ}}} \quad (3)$$

Здесь $\eta_{\text{НЭМИ}}$ – вязкость раствора после обработки его НЭМИ, Па·с; η_0 – исходная вязкость раствора, Па·с; e – коэффициент интенсивности «разжижения» связующего при его обработке НЭМИ; $\tau_{\text{обр.НЭМИ}}$ – продолжительность обработки НЭМИ, мин.

На втором этапе в процессе фильтрации через наполнитель, плакированный гелеобразователем, наблюдается резкое повышение вязкости раствора, которое описывается параболической зависимостью

$$\frac{\eta - \eta_{\text{НЭМИ}}}{\eta_{\text{НЭМИ}}} = A t_{\text{фильтр}}^2 \quad (4)$$

где η – вязкость пропитывающего раствора, изменяемая в процессе фильтрации через плакированный зернистый материал, Па·с; A – коэффициент интенсивности гелеобразования раствора при его

фильтрации через плакированный зернистый материал, c^2 ,
т. фильтр – продолжительность фильтрации, с.

С учетом установленных закономерностей изменения вязкости растворов со временем в процессах обработки НЭМИ и фильтрации через наполнитель, плакированный гелеобразователем, методом разделения переменных и интегрирования получена математическая модель кинетики фильтрации в гелеобразующих системах, активированных НЭМИ, в виде следующего выражения

$$h = \sqrt{\frac{2K\Delta P}{\eta_0 e^{\tau_{\text{обр.НЭМИ}}/\sqrt{A}}} \cdot \arctg(\sqrt{A}\tau_{\text{фильтр}})} \quad (5)$$

Здесь ΔP – градиент давления, вызывающий фильтрацию, Па; K – коэффициент проницаемости уплотненного плакированного зернистого материала в оснастке, m^2 .

При варьировании факторов расхождение расчетных и опытных значений параметров не превышает 5...8 %, что, в целом, свидетельствует об адекватности полученных теоретических зависимостей электроимпульсно-фильтрационного формообразования.

Методика расчета технологических параметров электроимпульсно-фильтрационного формообразования реализована в разработанной программе «FILTRAT». Она позволяет для каждого типоразмера стержней и форм рассчитать оптимальные значения остаточного воздушного давления в оснастке и прогнозировать изменения вязкости связующего при обработке НЭМИ и фильтрации, определяющие характер формообразования при соблюдении условия ламинарного потока жидкости в пористой среде.

Технологии электроимпульсно-фильтрационного формообразования являются логическим развитием «АлЗнаС-процесса» (авторы: Александров В.М., Знаменский Л.Г., Солодянкин А.А.) и разработаны как альтернатива «Шоу-процесса». В отличие от него удается добиться практически нулевой усадки за счет предварительного создания в оснастке жесткой скелетной структуры сухого наполнителя и последующего введения в него жидкого гелеобразующего связующего. В результате практически полностью устраняется трещинообразование форм (стержней).

Электроимпульсно-фильтрационное формообразование для изготовления крупногабаритных стержней в чугунном художественном литье по выплавляемым моделям предусматривает ярусный подвод связующего в стержневой ящик. Разработанная методика расчета оптимальных параметров в этом случае состоит в том, что, задаваясь физико-химическими характеристиками связующего раствора, условиями его обработки НЭМИ, а также свойствами плакированного наполнителя и технологически приемлемыми значениями остаточного давления в оснастке и продолжительностью гелеобразования, определяют значения радиуса отверженной части смеси. Указанный параметр является основным при проектировании оснастки для изготовления стержней. В частности,

расстояние между отверстиями для пропитки не должно превышать рассчитанное значение радиуса отверженной части смеси. Только в этом случае при ярусном подвиде связующего раствора в оснастку с плакированным наполнителем может быть достигнуто перекрывание полушиаров отверженной части смеси. В результате обеспечивается точность воспроизведения стержнем сложной рабочей поверхности стержневого ящика.

Четвертая глава посвящена решению проблемы разработки новых составов и способов приготовления гипсовых смесей для тонкорельефного литья из цветных сплавов. Изготовление стержней и форм с улучшенными физико-механическими характеристиками достигается применением в качестве затворителей гипса металлофосфатных растворов, а также технологической добавки – циклонной пыли шамотного производства (ЦПШП). За счет совместного использования ЦПШП и кремнеземистого наполнителя в разработанных смесях обеспечивается при нагреве более «плавное» расширение форм и стержней на гипсовом связующем. Это дает возможность ускорить их прокалку без трещинообразования. Об этом свидетельствуют результаты дилатометрии и дериватографии, представленные соответственно на рис.4 и 5. Общий цикл операции прокалки форм сокращен в 1,7...2,0 раза, что делает технологический процесс литья по выплавляемым моделям энергосберегающим.

Дилатометрические исследования показали также, что в интервале температур 20...700⁰С разработанные составы имеют коэффициент термического линейного расширения в 3...4 раза меньше, чем у лучших отечественных и импортных формовочных масс, обеспечивая этим повышение точности форм и отливок. Используемые компоненты смесей делают их экономичными, экологически безопасными и конкурентоспособными в точном литье.

Впервые предложены в качестве замедлителей затвердевания высокопрочного гипса алюмохромфосфатное связующее (АХФС) и алюмборфосфатный концентрат (АБФК). Установлен механизм взаимодействия в системе «гипс – металлофосфатный раствор». Образующиеся при диссоциации и гидролизе АХФС и АБФК фосфат-ионы дифундируют к поверхности частиц гипса, в результате чего на поверхности раздела фаз возникает двойной электрический слой. С увеличением его толщины молекулам воды кинетически труднее проникнуть к гранулам порошкообразного связующего, что замедляет процесс затвердевания суспензии. Это наблюдается при использовании металлофосфатных растворов с pH = 5...6 ед., когда реализуется только физическая схема взаимодействия, основанная на адсорбции на поверхности частиц связующего ионов, уменьшающих скорость затвердевания гипсовой массы. Затворение высокопрочного гипса металлофосфатным раствором с pH = 1...3 ед., помимо физической адсорбции, приводит к химическому взаимодействию, в ходе которого происходит выделение газов и вспенивание

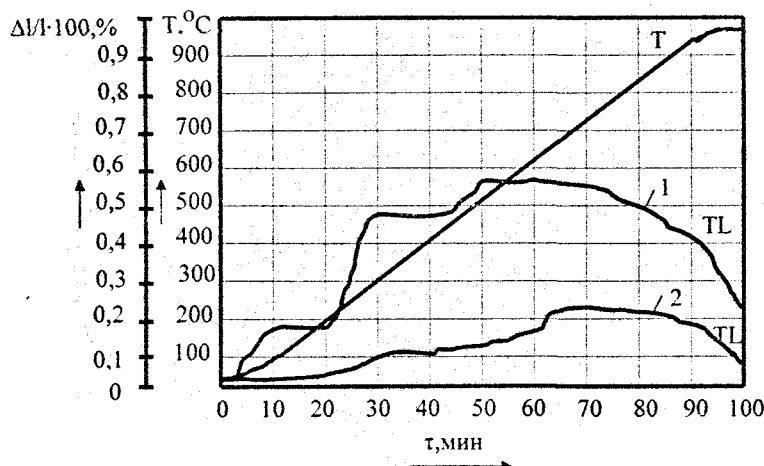


Рис.4. Дилатометрия смесей: 1– «Ultra-vest»; 2– разработанная

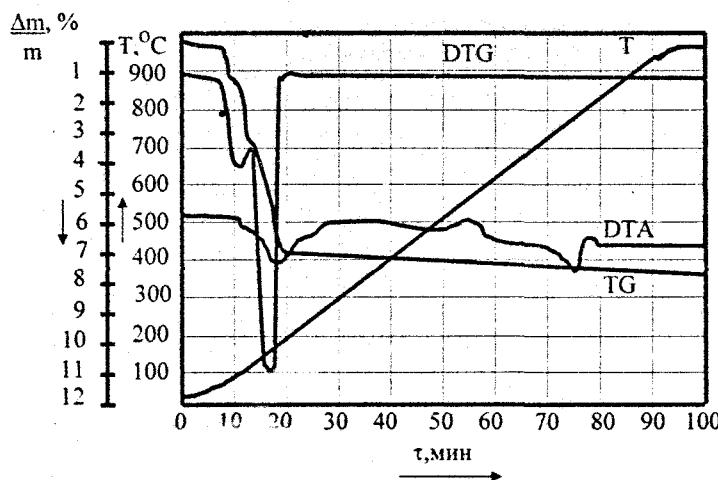


Рис.5. Дериватограмма разработанного состава гипсо-кремнеземистой смеси

сусpenзии. «Разрыхляющее» газовое влияние на адсорбционные слои мицеллы гипсовой сусpenзии создает условия для повышения скорости диффузии молекул воды и, по сравнению с физической стадией, интенсифицирует процесс гидратации гипса и отверждение смеси.

Разработанные составы гипсо-кремнеземистых масс обеспечивают возможность регулирования в широких пределах реологических свойств: вязкости и живучести сусpenзий. В связи с этим предложены их ультразвуковая активация и комбинированное воздействие вакуума, барботажа, ультразвука на указанные самотвердеющие смеси и процессы формообразования. Установлено, что ультразвуковая обработка (УЗ) гипсовых сусpenзий в 1,5...1,7 раза снижает их вязкость, на 3...5 минут увеличивает время конца схватывания и мало изменяет момент начала затвердевания смесей, способствует повышению прочности форм в 1,9...2,0 раза и уменьшению их осыпаемости в 1,8...1,9 раз. Оптимальный режим ультразвуковой обработки для рассматриваемых систем следующий: интенсивность $I = 18\dots20 \text{ кВт/м}^2$, частота $f = 15\dots18 \text{ кГц}$, продолжительность воздействия $\tau = 7\dots13 \text{ минут}$.

Разработан вакуумно-ультразвуковой способ дегазации самотвердеющих формовочных смесей. Его использование снижает в 1,6...1,9 раза пористость форм и повышает в 1,9...2,1 раза их прочность. С увеличением интенсивности и уменьшением частоты ультразвука эффективность дегазации возрастает. Получена математическая модель кинетики вакуумно-ультразвуковой дегазации самотвердеющих формовочных масс в виде системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} h = \frac{2}{9} g \frac{(\rho_C - \rho_F)}{\eta_0} \cdot (r^2 (\tau_{OBP}^H + \frac{1}{K_1} (e^{K_1(\tau_P - \tau_{OBP}^H)} - 1)) + \\ + R^2 \cdot e^{K_1(\tau_{OBP}^K - \tau_{OBP}^H)} (\tau_H - \tau_{OBP}^K + \frac{1}{K_1} (1 - e^{K_1(\tau_P - \tau_{OBP}^K)})) + \\ + \frac{1}{K_2} (1 - e^{-K_2(\tau_K - \tau_H)})), \\ R = \frac{0,4}{f} \cdot \left(1 - \frac{(P_{\text{ВНЕШ}} + P_{\text{СТ}})}{P_{y3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{P_{y3}}{\rho_C}}, \\ P_{y3} = \sqrt{\frac{2N\rho_C c}{S}} = \sqrt{2I\rho_C c}, \\ P_{y3} \geq P_{\text{ВНЕШ}} + P_{\text{СТ}} + \frac{4\sigma}{3r} \sqrt{\frac{2\sigma}{3r \cdot (P_{\text{ВНЕШ}} + P_{\text{СТ}} + \frac{2\sigma}{r})}}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где h – высота подъёма газового пузырька в самотвердеющей смеси в УЗ поле, м; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; ρ_s – плотность смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_g – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; η_0 – начальная динамическая вязкость смеси, $\text{Па}\cdot\text{с}$; r – начальный радиус пузырька, м; R – радиус кавитационного пузырька, м; K_1 – коэффициент интенсивности изменения динамической вязкости в зависимости от параметров УЗ воздействия, с^{-1} ; K_2 – коэффициент интенсивности изменения динамической вязкости в зависимости от состава смеси, с^{-1} ; f – частота ультразвука, Гц; $P_{\text{внеш}}$ – внешнее давление над формой, Па; $P_{\text{ст}}$ – гидростатическое давление, Па; $P_{\text{уз}}$ – амплитуда ультразвукового давления, Па; N – мощность ультразвукового поля, Вт; c – скорость распространения ультразвука в среде, $\text{м}/\text{с}$; S – площадь излучающей поверхности, м^2 ; I – интенсивность ультразвука, $\text{Вт}/\text{м}^2$; τ_p , $\tau_{\text{обр}}^h$, $\tau_{\text{обр}}^k$, τ_h , τ_k – моменты времени после затворения формовочной массы, соответствующие расширению кавитационной полости, началу и концу УЗ обработки, началу и концу схватывания смеси, с; σ – поверхностное натяжение на границе «жидкость – газ», $\text{Дж}/\text{м}^2$.

Разработанные модель и методика, реализованная в компьютерной программе «UZ», позволяют рассчитать для различных типоразмеров форм оптимальные значения интенсивности ультразвукового поля при его резонансной частоте и остаточного воздушного давления в оснастке, обеспечивающих максимальную дегазацию самотвердеющих гипсовых супспензий в цветном литье по выплавляемым моделям.

Для условий прогрессивного способа литья по вытяжным резиновым моделям предложена барботажно-ультразвуковая обработка самотвердеющих супспензий, обеспечивающая высокопористую структуру гипсо-кремнеземистых форм. При этом за счёт барботажа смеси сжатым воздухом удается добиться требуемой её газонасыщенности, а последующей ультразвуковой обработкой – равномерного распределения во всем объёме воздушных пузырьков под действием кавитации и акустических течений, инициируемых ультразвуковым полем. Полученные гипсовые формы обладают повышенной газопроницаемостью 100...110 ед., прочностью при сжатии 5...6 МПа, низким коэффициентом термического линейного расширения, равным $(0,09...0,11) \times 10^{-5}$ $1/\text{^{\circ}C}$. Такой комплекс свойств необходимым для изготовления точных машиностроительных отливок ответственного назначения, например турбоколес из алюминиевых сплавов.

Разработанные способы могут быть отнесены к нанотехнологиям и обеспечивают целенаправленное воздействие на микроструктуру формовочных материалов и смесей соответственно в точном литье по выплавляемым и вытяжным резиновым моделям.

В пятой главе, учитывая комплексный подход к разработке теоретических и технологических основ электроимпульсной активации материалов и процессов в точном литье, рассмотрены закономерности воздействия НЭМИ на структуру и свойства алюминиевых сплавов в жидком и твердом состояниях. Решение этих проблем, в том числе, представляется

принципиально важным в сочетании с разработанными технологиями формообразования для изготовления сложнопрофильных отливок.

Воздействие НЭМИ вызывает изменение свойств исследуемых алюминиевых расплавов АК7 и АК5М (табл.2): увеличивается жидкотекучесть на 30...50 %, снижается на 12...16% вязкость, уменьшается на 8...10 % поверхностное натяжение (σ), существенно повышается растворимость и обеспечивается равномерность распределения легирующих элементов.

Таблица 2
Влияние обработки расплава НЭМИ на свойства АК5М

Свойства	Без воздействия	После обработки расплава НЭМИ
Жидкотекучесть по спиральной пробе ГОСТ 16438-70, мм	170...180	290...295
Поверхностное натяжение, Н/м	0,81	0,74
Прочность на разрыв, МПа	270...285	340...350
Относительное удлинение, %	0,8...1,0	2,3...2,5
Форма зерен кремния	Иглообразная	Компактная
Размер зерна отливок, мкм	100...200	40..60

Обработка НЭМИ расплавов изменяет их энергетическое состояние, уменьшая σ на межфазной границе «кристаллы – расплав». Это сокращает критический размер зародышей и способствует формированию дополнительных центров кристаллизации и измельчению зерна. Воздействие НЭМИ вызывает интенсификацию массопереноса и блокирует рост дендритных ветвей. При этом после некоторого переохлаждения более вероятна объемная кристаллизация, исключающая образование зоны столбчатых кристаллов и определяющая однородную мелкозернистую структуру отливок. В результате обеспечивается повышение на 15...20% прочности и в ряде случаев зафиксировано трехкратное увеличение пластичности литьевых алюминиевых сплавов.

Изучены процессы легирования алюминия тугоплавкими металлами (молибден, титан, цирконий) в поле НЭМИ. Результаты термодинамического анализа показывают, что при обработке расплавленного алюминия галогенидами тугоплавких металлов при 700...1100°C возможно самопроизвольное протекание реакций восстановления Mo, Ti, Zr из их хлоридов или иодидов ($\Delta G < 0$). Для их термического разложения при указанных температурах $\Delta G > 0$. Установлены закономерности кинетики протекающих взаимодействий. Результаты исследований показывают, что НЭМИ оказывает каталитическое воздействие на процессы в системе «алюминиевый расплав – галогениды тугоплавких металлов». В указанном электромагнитно-импульсном поле в 2..3 раза увеличиваются скорости растворения в расплавленном алюминии (марка А85) меди, молибдена,

титана и циркония. Эффект вызывается интенсификацией процессов массо- и теплопереноса при поглощении расплавом энергии НЭМИ и обеспечивает равномерность распределения указанных элементов в алюминиевой матрице. Об этом, в частности, свидетельствуют результаты растровой электронной микроскопии (РЭМ100У), представленные на рис.6.

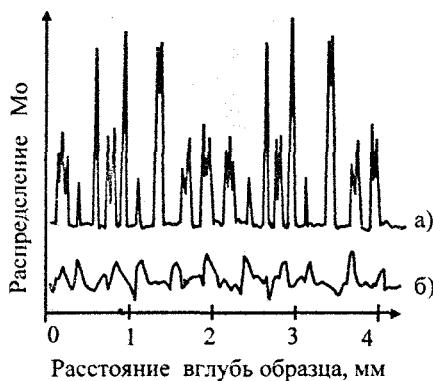


Рис.6. Распределение Mo в сплаве Al-2%Mo (РЭМ 100У):
а – без НЭМИ; б – с НЭМИ

Как показали проведенные исследования на дифрактометре «ДРОН-4» параметр решетки в рассматриваемом случае изменяется с 4,0494 до 4,0476 ангстрем. Зафиксированы эффекты диспергирования и изменения морфологии образующихся интерметаллидов и их модифицирующее действие на промышленные алюминиевые сплавы. Воздействие НЭМИ вызывает глубокую «перестройку» микроструктуры исследуемых алюминиевых сплавов (рис.7).

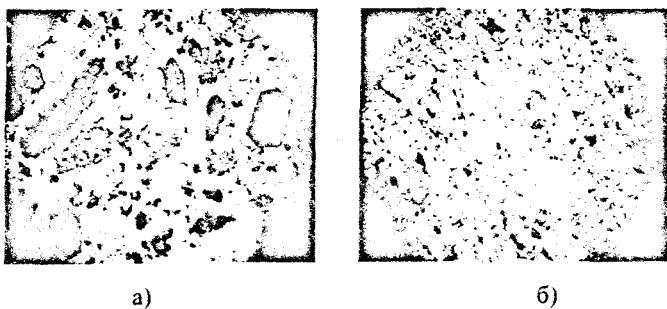


Рис.7. Микроструктуры сплава Al-2%Mo: а – без НЭМИ, б – с НЭМИ

Происходит диспергирование крупных (90...100 мкм) интерметаллидов (Al_3Mo), имеющих форму развитых многогранников. В результате при электроимпульсном воздействии высокой мощности образуются компактные глобулярные мелкокристаллические интерметаллидные включения размером 3...5 мкм.

Химический состав рассматриваемых сплавов, определённый с использованием растрового электронного микроскопа РЭМ100У, в этом случае следующий: Al – 97,2...97,5%; Mo – 1,9...2,1%; Fe – 0,25...0,28%; Si – 0,062...0,068%; примеси – остальное. Результаты их качественного рентгенофазового анализа представлены на рис.8. Приведённые дифрактограммы (ДРОН-4) показывают, что при обработке расплавленного алюминия без воздействия НЭМИ хлоридом молибдена и последующего затвердевания в гипсовой форме возникают крупнокристаллические фазы Al_3Mo , $\text{Mo}(\text{Si}, \text{Al})_2$ и FeAl_2 . В процессе плавки содержание Fe и Si увеличивается из-за взаимодействия Al с кварцевой оgneупорной краской металлического тигля и стальным плавильным инструментом. Растворимость железа в твердом алюминии ниже 400 °C практически равна нулю и поэтому Fe выделяется в виде интерметаллида, имеющего средний размер 300...400 мкм и пластинчатую морфологию. При обработке в поле НЭМИ (мощность 1,0...1,5 МВт, частота следования импульсов 950...1000 Гц, продолжительность воздействия 30...40 мин) расплавленного Al хлоридом Mo фаза FeAl_2 рентгенофазовым анализом невыявлена, что свидетельствует о максимально полном в этом случае растворении Fe в алюминии. Зафиксированные же тугоплавкие интерметаллиды (см. рис. 8) существенно диспергируются при электромагнитно-импульсном воздействии. Они являются дополнительными центрами кристаллизации и вызывают модифицирующее влияние на структуру сплавов.

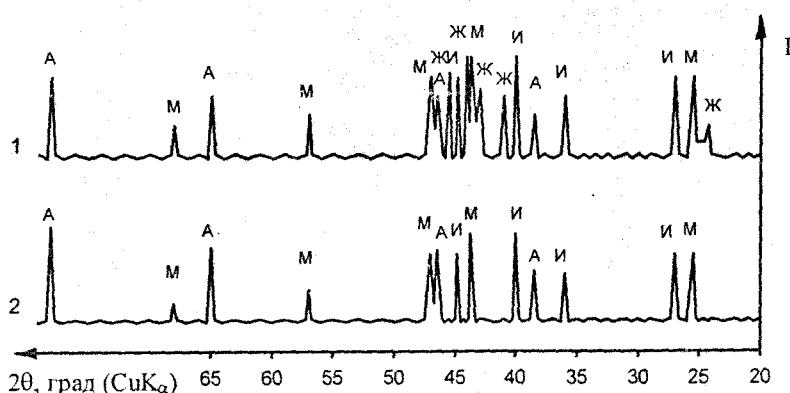


Рис. 8. Дифрактограммы сплавов, полученных при обработке расплавленного алюминия MoCl_3 ; 1 – без НЭМИ, 2 – с НЭМИ; А – Al; Ж – FeAl_2 ; М – $\text{Mo}(\text{Si}, \text{Al})_2$; И – интерметаллид Al_3Mo

Применение мелкокристаллических лигатур Al-Mo, Al-Ti, Al-Zr, полученных с использованием НЭМИ, определяет увеличение пластических свойств и повышение прочностных характеристик сплавов АК7 и АК5М, улучшение их жидкотекучести. Воздействие на рассматриваемые системы НЭМИ с удельной мощностью 700...800 МВт/м³ вызывает образование локальных импульсных электромагнитных полей высокой напряженности, частично разрушающих кластеры расплава и тем самым существенно увеличивающих его жидкотекучесть. Тугоплавкие легирующие элементы оказывают модифицирующее воздействие, вызывая диспергирование структуры рабочих алюминиевых сплавов.

При использовании приготовленных под действием НЭМИ мелкокристаллических модифицирующих лигатур «алюминий – тугоплавкие металлы» четко проявляются следующие закономерности: зависимость эффекта модификации от параметров интерметаллидов в лигатуре; сохранение наследственного влияния структурных параметров лигатур в течение длительных изотермических выдержек модифицированного расплава (20...90 мин); сохранение наследственного влияния мелкокристаллических лигатур после кристаллизации, повторного расплавления, перегрева до 800...900°C и выдержек при этих температурах в течение 20...30 мин. Избирательное воздействие модифицирующих лигатур типа Al-Mo, Al-Ti, Al-Zr на структуру и свойства алюминиевых сплавов осуществляется, главным образом, через морфологию интерметаллидов.

Установлено, что легирование алюминия и его сплавов тугоплавкими металлами из их галогенидов при одновременном воздействии наносекундных электромагнитных импульсов создает условия для эффективного управления процессами формирования высокодисперсной микроструктуры алюминиевых сплавов и обеспечивает улучшение их литейных и механических свойств. На основании проведенных исследований разработаны технологии подготовки модифицирующих лигатур и приготовления алюминиевых расплавов.

В заключительной шестой главе приведены результаты промышленных испытаний и освоения разработанных электроимпульсных и ультразвуковых технологических процессов формообразования и приготовления расплавов в художественном и машиностроительном литье по выплавляемым и вытяжным резиновым моделям.

За счет обеспечения высоких физико-механических свойств керамических форм на активированных НЭМИ связующих растворах решена проблема перевода производства кабинетных чугунных художественных отливок с низкопроизводительной старинной кусковой формовки на прогрессивный способ литья по выплавляемым моделям. При этом повышение качества тонкорельефного литья достигнуто также применением точных, легкоудаляемых стержней, изготовленных по методу электроимпульсно-фильтрационного формообразования. Их выгодно отличает высокая трещиноустойчивость на всех стадиях литья по выплавляемым моделям, ускоренное формирование прочности смеси непосредственно в

оснастке, а главное, саморазупрочнение стержней после затвердевания расплава в форме и последующего охлаждения чугунных отливок. В результате появляется возможность удаления стержней из глухих, сложных по конфигурации полостей художественных отливок простым высыпанием смеси.

В ходе промышленных испытаний в точном литье цветных сплавов (бронзы, латуни, силумины) практически подтверждена эффективность использования предлагаемых гипсо-кремнеземистых смесей с металлофосфатными затворителями и способов их подготовки с применением ультразвука, вакуума и барботажа. Показано на широкой номенклатуре отливок (150 наименований) с годовым выпуском 180 тонн, что разработанные технологии позволяют получать высококачественное художественное литье по выплавляемым моделям не только мелкого развеса, но и крупногабаритные кабинетные и скульптурные изделия массой 80...100 кг и более. Лучшие импортные гипсовые смеси «ULTRAVEST», «CERRCAST» являются узкоспециализированными на ювелирное литье и при повышении массы отливок вызывают их брак по засорам, газовым раковинам. Себестоимость за 1кг таких формовочных масс находится в пределах 2,0...2,5 доллара США. Предлагаемые смеси на порядок дешевле, экономичны и конкурентоспособны в художественном литье из цветных сплавов. Барботажно-ультразвуковой способ изготовления высокопористых гипсовых форм в сочетании с электроимпульсной обработкой металлических расплавов обеспечивают улучшение качества машиностроительных отливок из алюминиевых сплавов, полученных литьём по вытяжным резиновым моделям.

В целом, при использовании разработанных технологий в производстве удалось более чем на 30% уменьшить толщины стенок отливок, значительно улучшить качество их тонкорельефной поверхности, на 25...30% снизить себестоимость точного литья, повысить его экологическую безопасность. Промышленное освоение разработанных технологий дало экономический эффект на ряде предприятий Уральского региона: ЗАО «Каслинский машиностроительный завод (КМЗ)» (г. Касли), ЗАО «Уральская бронза» (г. Челябинск), производственном предприятии «Престиж, стабильность, профессионализм (ПСП)» (г. Челябинск) в размере 15 млн. руб. (в ценах 2003 г.).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Использование полей НЭМИ позволяет эффективно воздействовать на структуру и свойства коллоидных растворов, к числу которых относятся ГРЭТС и ЖС. При этом зафиксирована глубокая мицеллярная перестройка и появление таких эффектов, как ионизация, диспергирование, аномально-резкое падение вязкости и удельного электросопротивления рассматриваемых коллоидно-дисперсных систем. Наблюдаемые изменения свойств находят свое теоретическое обоснование в рамках электрон -

радикального механизма протекания процесса импульсного радиолиза указанных связующих растворов.

2. Наибольший эффект в синтезе связующих с заранее заданным комплексом свойств может быть достигнут при воздействии НЭМИ непосредственно в ходе гидролиза ЭТС. Механизм его прохождения в этом случае связан с импульсным радиолизом воды, который обуславливает появление в гидролизате атомов Н и радикалов ОН. Являясь химически активными частицами, водород активно отщепляет этоксильные группы от атома кремния с образованием этилового спирта, а ОН легко присоединяется к полученному макрорадикалу $\equiv\text{Si}\bullet$. В результате в 2,0...2,5 раза ускоряется процесс гидролиза ЭТС, что способствует образованию большего количества зародышей мицелл и формированию тонкодисперсного с низкой вязкостью связующего раствора. При этом электроимпульсная обработка интенсифицирует не только гидролиз, но и поликонденсационные процессы, приводящие при последующей выдержке ГРЭТС к агрегации его коллоидных частиц.

3. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан электроимпульсно-химический способ подготовки ЭТС связующих с улучшенным комплексом свойств. Он состоит в проведении гидролиза этилсиликата водными растворами солей алюминия ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (20...25 %) или $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (25...30 %)) при воздействии НЭМИ с разбавлением гидролизата до необходимого содержания SiO_2 3...5 % водными растворами высокомолекулярных ПАВ (ПВС и КМЦ-Н) при достижении отношения $r_f/r_i = (0,8...1,4) \times 10^{-5}$ для ЭТС-40 и $r_f/r_i = (0,4...1,0) \times 10^{-5}$ для ЭТС-32. Оптимальные параметры НЭМИ: удельная мощность – $N = 550...650 \text{ MBt/m}^3$, частота следования импульсов – $f = 800...1000 \text{ Гц}$, продолжительность обработки – до момента ввода разбавителя. Использование разработанного электроимпульсно-химического способа подготовки ГРЭТС без органических растворителей в 4...5 раз повышает живучесть супензии, увеличивает в 2,0...2,5 раза прочность керамических форм, в том числе при высоких температурах.

4. Одним из эффективных направлений повышения точности и прочности керамических форм на ЖС в «горячем» состоянии является повышение его модуля. Высокоскоростная и экономичная подготовка высокомодульного жидкостекольного связующего может быть осуществлена по принципу объединения электроимпульсной и мембранных технологий. Указанная электрофизическая обработка вызывает разрыв связей Na^+ с кремнекислородным тетраэдром и способствует увеличению в интермицеллярной жидкости коллоидного раствора ионов натрия. Это интенсифицирует процесс их «откачки» через полупроницаемую мембрану под действием тока электродиализа. В результате обеспечивается ускоренное получение высокомодульного ЖС для литья по выплавляемым моделям.

5. Для математического описания изменения удельной проводимости коллоидных растворов ЖС в процессе их электродиализа в поле НЭМИ получена система уравнений $\sigma=f(t)$. С ее учетом создана математическая модель кинетики электроимпульсно-мембранный обработки ЖС. Она экспериментально подтверждена и положена в основу методики расчета оптимальных технологических параметров, реализованной в компьютерной программе «EID.exe», которая позволяет в зависимости от различных условий производства при задаваемых параметрах НЭМИ выбрать величину тока электродиализа, рассчитать напряжение, подаваемое на электроды, и оптимальное время подготовки ЖС заданного модуля и свойств. За счет активации диализной обработки связующего раствора удается за 1...3 часа добиться модуля ЖС в пределах 5...8 ед. Использование такого связующего в литье по выплавляемым моделям обеспечивает увеличение в 2,0...2,5 раза прочности керамических форм в горячем состоянии, исключает пригарообразование и улучшает выбиваемость точных отливок из черных сплавов.

6. Принципиально новым направлением в решении проблемы повышения качества отливок является разработка технологий фильтрационного формообразования, основанных на активации наносекундными электромагнитными импульсами материалов и процессов в точном литье. Оптимальными свойствами для условий этого нового вида формообразования обладают фильтрационно-гелеобразующие системы: «ГРЭТС – наполнитель, плакированный смесью ЖС и ФХШ»; «ЖС – наполнитель, плакированный хлоридом алюминия». Фильтрация в этих системах обеспечивает ускоренное получение в пористом теле коагуляционных структур, обеспечивающих адгезионное “цепление” частиц наполнителя и повышение точности и термопрочности изготавливаемых стержней и форм в точном литье. Обработка пропитывающих растворов НЭМИ по определенным режимам ($N_1 = 300...400 \text{ МВт}/\text{м}^3$, $t_{обр1} = 2...6 \text{ мин}$ для ГРЭТС и $N_2 = 400...500 \text{ МВт}/\text{м}^3$, $t_{обр2} = 15...20 \text{ мин}$ для ЖС) вызывает снижение более чем в 1,5 раза их кинематической вязкости и повышение в 2,0...2,5 раза глубины пропитки в рассматриваемых фильтрационно-гелеобразующих системах.

7. Методами рН-метрии, рентгенофазового анализа и инфракрасной спектроскопии установлены механизмы фильтрационного формообразования указанных гелеобразующих систем. В частности, применительно к ЭТС связующему формирование прочности смеси обусловлено массопереносом щелочных продуктов реакции из плакирующего слоя наполнителя в гидролизованный раствор этилсиликата, приводящим к повышению его рН до значения 5...6 и огеливанию в процессе фильтрации через плакированный наполнитель. Особенностью фильтрационного формообразования с использованием жидкостекольного связующего является выделение геля кремниевых кислот в зонах контакта между частицами плакированного наполнителя вследствие взаимодействия ЖС с хлоридом алюминия.

8. На первом этапе вязкость пропитывающего раствора при увеличении продолжительности его обработки НЭМИ уменьшается и ее изменение со временем характеризуется показательной функцией. На втором этапе в процессе фильтрации через плакированный наполнитель в результате гелеобразования наблюдается резкое повышение вязкости раствора, математически описываемое параболической зависимостью. С учетом установленных закономерностей изменения вязкости растворов со временем в процессах обработки НЭМИ и фильтрации получена модель электроимпульсно-фильтрационного формообразования. При варьировании факторов расхождение расчетных и опытных значений параметров не превышает 5...8 %. Модель позволяет для каждого типоразмера стержней и форм рассчитать оптимальные значения остаточного воздушного давления в оснастке и прогнозировать изменения вязкости связующего при обработке НЭМИ и в процессе фильтрации, определяющие характер формообразования при соблюдении условия ламинарного потока жидкости в пористой среде.

9. Результаты испытаний показывают, что разработанные технологии электроимпульсно-фильтрационного формообразования позволяют исключить осыпаемость, обеспечить неограниченный во времени срок хранения смеси, добиться повышения в 1,5...2,0 раза прочности, в особенности в горячем состоянии, увеличить более чем в 1,5 раза выбиваемость стержней и форм при их высокой размерной точности. В результате улучшается качество точных отливок. Повышение стабильности изготовления стержней и форм достигается обработкой НЭМИ гелеобразующих растворов и соблюдением оптимального диапазона значений воздушного разряжения в оснастке 0,01...0,05 МПа или избыточного (сверх атмосферного) давления $(2...3)\times 10^5$ Па связующих, обеспечивающих возможность управления фильтрационными процессами.

10. Разработаны новые составы гипсо-кремнеземистых смесей с регулируемым комплексом свойств, необходимым для эффективного воздействия ультразвука в режиме развитой кавитации и комбинированных на его основе физических методов. Изготовление стержней и форм на гипсовом связующем с улучшенными физико-механическими характеристиками достигается применением в качестве затворителей металлофосфатных водных растворов и циклонной пыли шамотного производства. Дилатометрические исследования показали, что в интервале температур $20...700^\circ\text{C}$ разработанные составы имеют КТЛР $0,45\cdot 10^{-5} 1/\text{C}$ (состав I типа) и $0,23\cdot 10^{-5} 1/\text{C}$ (состав II типа), что в 2...4 раза меньше, чем у лучших отечественных и импортных формовочных смесей, обеспечивая этим повышение точности форм и отливок в литье по выплавляемым моделям.

11. Предложено использование ультразвуковой активации формовочных материалов и комбинированное воздействие вакуума, барботажа, ультразвука на самотвердеющие смеси и процессы формообразования. Установлено, что ультразвуковая обработка гипсовых суспензий в 1,5...1,7 раза снижает их вязкость, на 3...5 минут увеличивает время конца схватывания и мало изменяет момент начала затвердевания

смесей, способствует повышению прочности форм в 1,9...2,0 раза и уменьшению их осыпаемости в 1,8...1,9 раз. Оптимальный режим УЗ обработки следующий: интенсивность $I = 18...20 \text{ кВт/м}^2$, частота $f = 15...18 \text{ кГц}$, продолжительность воздействия $t = 7...13 \text{ минут}$.

12. Разработан вакуумно-ультразвуковой способ дегазации формовочных смесей. Его использование снижает в 1,6...1,9 раза пористость форм и повышает в 1,9...2,1 раза их прочность. С увеличением интенсивности и уменьшением частоты ультразвука эффективность дегазации возрастает. Для управления этими сложными многофакторными процессами получена математическая модель кинетики вакуумно-ультразвуковой дегазации самотвердеющих формовочных масс в виде системы уравнений, позволяющих рассчитать для различных типоразмеров форм оптимальные значения интенсивности ультразвукового поля при его резонансной частоте и остаточного воздушного давления в оснастке для обеспечения максимальной дегазации самотвердеющих гипсовых суспензий в цветном литье по выплавляемым моделям.

13. Для условий прогрессивного способа литья по вытяжным резиновым моделям предложена барботажно-ультразвуковая обработка самотвердеющих суспензий, обеспечивающая высокопористую структуру гипсо-кремнеземистых форм. При этом за счёт барботажа смеси сжатым воздухом удается добиться требуемой её газонасыщенности, а последующей ультразвуковой обработкой – равномерного распределения во всем объёме воздушных пузырьков под действием кавитации и акустических течений, инициируемых ультразвуковым полем. Полученные гипсовые формы обладают повышенной газопроницаемостью 100...110 ед., прочностью при сжатии 5...6 МПа, низким коэффициентом термического линейного расширения, равным $(0,09...0,11) \times 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$. Такой комплекс свойств является необходимым для изготовления точных машиностроительных отливок ответственного назначения, например турбоколес из алюминиевых сплавов.

14. Воздействие НЭМИ вызывает изменение свойств расплавов АК7 и АК5М: увеличивается на 30...50% их жидкотекучесть, обеспечивается повышение на 15...20% прочности и в ряде случаев зафиксировано трехкратное увеличение пластичности алюминиевых сплавов. Электроимпульсная обработка изменяет энергетическое состояние расплавов, уменьшая на 8...10% поверхностное напряжение на межфазной границе «кристаллы – расплав». Это сокращает критический размер зародышей и способствует формированию дополнительных центров кристаллизации, определяющих однородную мелкозернистую структуру отливок. При этом обеспечивается равномерность распределения легирующих элементов и наблюдается изменение морфологии включений кремния с игольчатой на компактную блочную.

15. В электромагнитно-импульсном поле в 2...3 раза увеличивается скорость растворения в расплавленном алюминии молибдена, титана и циркония. Этот эффект вызывается интенсификацией процессов массо- и

теплопереноса при поглощении расплавом энергии НЭМИ и обеспечивает равномерность распределения указанных элементов в алюминиевой матрице. Исследованиями на дифрактометре «ДРОН-4» установлено искажение кристаллической решетки алюминия после его обработки хлоридом молибдена в поле НЭМИ: параметр решетки изменяется с 4,0494 до 4,0476 ангстрем. При этом наблюдается эффект увеличения при 20...25°C предельной растворимости в алюминии Mo с 0,1% масс. до 0,4% масс., Ti и Zr с 0,15% масс. до 0,8% масс.

16. Воздействие НЭМИ вызывает глубокую «перестройку» микроструктуры исследуемых алюминиевых сплавов. В поле НЭМИ происходит диспергирование крупных (90...100 мкм) интерметаллидов (Al_3Mo), имеющих форму развитых многогранников. В результате, при электроимпульсном воздействии высокой мощности образуются компактные глобуллярные мелкокристаллические интерметаллидные включения размером 5...8 мкм. Применение мелкокристаллических лигатур Al-Mo, Al-Ti, Al-Zr, полученных с использованием НЭМИ, определяет увеличение пластических свойств и повышение прочностных характеристик сплавов АК7 и АК5М, улучшение их жидкотекучести. Тугоплавкие легирующие элементы оказывают модифицирующее воздействие, вызывая диспергирование микроструктуры рабочих алюминиевых сплавов.

17. Разработанные электроимпульсные и ультразвуковые технологические процессы формообразования и приготовления расплавов освоены в художественном и машиностроительном литье. За счет обеспечения высоких физико-механических свойств керамических форм на активированных НЭМИ связующих растворах решена проблема перевода производства кабинетных чугунных художественных отливок с низкопроизводительной старинной кусковой формовки на прогрессивный способ литья по выплавляемым моделям. Повышение качества тонкорельефного литья достигнуто также применением точных, легкоудаляемых стержней, изготовленных по методу электроимпульсно-фильтрационного формообразования.

18. В ходе промышленных испытаний в точном литье цветных сплавов (бронзы, латуни, силумины) практически подтверждена эффективность использования предлагаемых гипсо-кремнеземистых смесей с металлофосфатными затворителями и способов их подготовки с применением ультразвука, вакуума и барботажа. Показано на широкой номенклатуре отливок (150 наименований) с годовым выпуском 180 тонн, что разработанные технологии позволяют получать высококачественное художественное литье по выплавляемым моделям не только мелкого развеса, но и крупногабаритные кабинетные и скульптурные изделия массой 80...100 кг и более. Барботажно-ультразвуковой способ изготовления высокопористых гипсовых форм в сочетании с электроимпульсной обработкой металлических расплавов обеспечивают повышение качества изготовления литьем по вытяжным резиновым моделям

машиностроительных отливок из алюминиевых сплавов, например турбоколес компрессоров двигателей внутреннего сгорания.

19. При использовании разработанных технологий в производстве удалось более чем на 30% уменьшить толщины стенок отливок, значительно улучшить качество их тонкорельефной поверхности, на 25...30% снизить себестоимость точного литья, повысить его экологическую безопасность. Промышленное освоение электроимпульсных и ультразвуковых технологических процессов формообразования и приготовления расплавов дало экономический эффект на ряде предприятий Уральского региона: ЗАО «Каслинский машиностроительный завод (КМЗ)» (г. Касли), ЗАО «Уральская бронза» (г. Челябинск), производственном предприятии «Престиж, стабильность, профессионализм (ПСП)» (г. Челябинск) в размере 15 млн. руб. (в ценах 2003 г.).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Знаменский Л.Г., Александров В.М., Солодянкин А.А. АлЗнаС-процесс для изготовления стержней // Литейное производство. – 1993. – № 1. – С.13–14.
2. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Дубровин В.К. Модель и методика расчета параметров АлЗнаС-процесса формообразования // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1995. – № 9. – С. 52–53.
3. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Дубровин В.К. Механизм АлЗнаС-процесса формообразования // Литейное производство. – 1995. – № 6. – С. 23–24.
4. Изготовление легкоудаляемых керамических стержней / Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин, А.Б. Кулаков, Л.Г. Знаменский //Литейное производство. – 1997. – №4. – С. 35–36.
5. Фильтрационное формообразование гелеобразующих систем в точном литье / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин, С.В. Рожков // Литейное производство. – 1997. – №4. – С. 34.
6. Кулаков Б.А., Дубровин В.К., Знаменский Л.Г. Влияние несинусоидальных электромагнитных импульсов на алюминиевые сплавы // Материаловедение и термическая обработка металлов: Всеросс. сб. научн. трудов. – Магнитогорск: МГТУ, 1999. – С. 21–23.
7. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ивочкина О.В. Электроимпульсная активация гидролиза этилсиликата в точном литье // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2000. – №5. – С. 37–39.
8. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ивочкина О.В. Электроимпульсно-диализная обработка жидкого стекла в точном литье // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 49–51.

9. Новые электрофизические методы активации материалов и процессов в точном литье / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.В. Крымский, О.В. Ивочкина // Тр. Междунар. форума по проблемам науки, техники и образования. – Москва, 2000. – С. 83–85.
10. Электроимпульсная обработка жидкого стекла и суспензий в точном литье / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.В. Крымский и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 3 – С. 52–54.
11. Аэрозольно-электроимпульсная обработка жидкостекольного связующего / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.В. Крымский, И.Н. Ердаков // Литейное производство – 2001. – № 1. – С. 19–20.
12. Электрофизическое регулирование свойств формовочных материалов в точном литье / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, И.Н. Ердаков, О.В. Ивочкина // Сб. тр. V съезда литейщиков России. – Москва: МИСиС, 2001. – С. 320–322.
13. Знаменский Л.Г., Ердаков И.Н. Металлофосфатные связующие в гипсовых смесях // Литейное производство. – 2001. – № 1. – С. 22–23.
14. Барботажно-ультразвуковая обработка гипсовых смесей в точном литье / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.А. Романов, О.В. Ивочкина. // Литейное производство. – 2001. – № 1. – С. 24–25.
15. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ивочкина О.В. Физико-химическое регулирование процесса поликонденсации этилсиликатных связующих // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. – № 1. – С 46–49.
16. Знаменский Л.Г., Ивочкина О.В., Кулаков Б.А. Мощные электроимпульсные поля в подготовке ЭТС связующих для точного литья // Тр. Междунар. форума по проблемам науки, техники и образования. – М.: Академия наук о земле, 2001. – Том 2. – С. 73–75.
17. Точное формообразование в художественном литье / Л.Г. Знаменский, В.К. Дубровин, И.Н. Ердаков, О.В. Ивочкина // Литейное производство, 2001. – № 1. – С. 32.
18. Электронно-ионная технология активации гипсовых формовочных смесей / Л.Г. Знаменский, В.С. Жабреев, О.О. Павловская, О.В. Ивочкина // Литейное производство. – 2001. – № 1. – С 18.
19. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ердаков И.Н. Закономерности получения формовочных смесей и литейных форм из материалов на основе системы «гипс – металлофосфатный раствор» для цветного литья // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2002. – № 4. – С 21–26.
20. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ердаков И.Н. Получение литейных форм повышенной точности из гипсовых смесей в цветном литье // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2002. – № 5. – С. 50–52.
21. Знаменский Л.Г. Активация этилсиликатных связующих наносекундными электромагнитными импульсами // Литейное производство. – 2002. – № 9. – С. 25–27.
22. Знаменский Л.Г. Вакуумно-ультразвуковая дегазация гипсовых смесей в точном литье // Литейное производство. – 2002. – № 10. – С. 26–28.

23. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ивочкина О.В. Изготовление гипсовых литейных форм с применением барботажно-ультразвуковой обработки // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2003. – № 2. – С. 21–23.
24. Ивочкина О.В., Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А. Электронно-ионная технология подготовки высокопрочного гипса в точном литье. / Труды VI съезда литейщиков России. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – С. 121–124.
25. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ивочкина О.В. Применение электромагнитно-импульсной обработки формовочных материалов и смесей при литье по выплавляемым моделям // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – № 4. – 2003. – С. 39–42.
26. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ивочкина О.В. Электронно-ионная активация формовочных смесей при литье по выплавляемым моделям // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2003. – № 5. – 2003. – С. 44–47.
27. Знаменский Л.Г. Теоретические и технологические основы электроимпульсной активации материалов и процессов в точном литье // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2003. – № 11. – С. 56–61.
28. Знаменский Л.Г. Электронно-ионная технология подготовки высокопрочного гипса в литье по выплавляемым моделям // Литье Украины. – 2003. – № 10. – С. 14–17.
29. Знаменский Л.Г. Активация наносекундными электромагнитными импульсами жидкостекольного связующего для точного литья // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – № 6. – 2003., С. 36–38.
30. Знаменский Л.Г. Электроимпульсные нанотехнологии активации процессов в точном литье // Заготовительные производства в машиностроении. – 2003. – № 12. – С. 3–7.
31. Знаменский Л.Г. Обработка алюминиевых расплавов галогенидами тугоплавких металлов в поле наносекундных электромагнитных импульсов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2004. – № 1. – С. 39–44.
32. Наносекундные электромагнитные импульсы и их применение / Под общ. ред. В.В. Крымского. – Челябинск: Изд-во Татьяна Лурье, 2001. – 110 с.
33. Знаменский Л.Г., Крымский В.В., Кулаков Б.А. Электроимпульсные нанотехнологии в литейных процессах. – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2003. – 130 с.
34. А.с. № 1766577. Способ подготовки материалов для изготовления керамических форм и стержней / В.М. Александров, Б.А. Кулаков, Л.Г. Знаменский, А.А. Солодянкин // Бюл. – 1992. – № 37. – С. 42
35. Патент СССР № 1838026А3. Способ изготовления литейных стержней и форм по холодной оснастке / В.М. Александров, Л.Г. Знаменский, А.А. Солодянкин, Б.А. Кулаков // Бюл. – 1993. – №32.

36. Патент РФ № 2086341. Способ изготовления литейных стержней и форм по холодной оснастке / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин, А.Б. Кулаков // Бюл. – 1997. – №22.

37. Патент РФ № 2088367. Способ приготовления этилсиликатного связующего / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин, А.Б. Кулаков // Бюл. – 1997. – №24.

38. Патент РФ № 2098220. Смесь и способ изготовления литейных керамических стержней / Б.А. Кулаков, Л.Г. Знаменский, В.К. Дубровин и др. // Бюл. – 1997. – № 34.

39. Патент РФ № 2118223. Способ приготовления жидкостекольного связующего для изготовления литейных керамических форм по выплавляемым моделям / Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Крымский В.В. // Бюл. – 1998. – № 24.

40. Патент РФ № 2118224. Способ приготовления этилсиликатного связующего / Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Крымский В.В. // Бюл. – 1998. – № 24.

41. Патент РФ № 2129932. Смесь для изготовления керамических форм и стержней при производстве отливок из цветных и драгоценных сплавов и способ ее приготовления / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.В. Крымский и др. // Бюл. – 1999. – № 13.

42. Патент РФ № 2145265. Способ изготовления литейных стержней и форм из жидкостекольных смесей / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.В. Крымский и др. // Бюл. – 2000 – № 4.

43. Патент РФ 2155114. Смесь для изготовления гипсовых форм и стержней при производстве отливок из цветных и драгоценных сплавов и способ ее приготовления / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, С.Н. Жабреев и др. // Бюл. – 2000 – № 24.

44. Патент РФ № 2162762. Способ приготовления смеси для изготовления гипсовых форм и стержней при производстве отливок из цветных сплавов / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.А. Романов, О.В. Ивочкина. // Бюл. – 2001. – № 4.

45. Патент РФ 2163524. Способ приготовления смеси для изготовления форм и стержней на гипсовом связующем при производстве отливок из цветных и драгоценных сплавов / Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ивочкина О.В. // Бюл. – 2001. – № 6.

46. Патент РФ № 2163854. Смесь для изготовления форм и стержней на гипсовом связующем при производстве отливок из цветных и драгоценных сплавов / О.В. Ивочкина, Л.Г. Знаменский, В.К. Дубровин и др. // Бюл. – 2001. – № 7.

47. Патент РФ № 2171728. Способ изготовления стержней и форм на гипсовом связующем при производстве отливок из цветных и черных сплавов / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, О.В. Ивочкина, И.Н. Ердаков // Бюл. – 2001. – №22.

48. Патент РФ 2175902. Смесь для изготовления форм и стержней на гипсовом связующем при производстве отливок из цветных и драгоценных сплавов / И.Н. Ердаков, Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков Б.А. и др. // Бюл. – 2001. – № 32.

49. Патент РФ 2198945. Способ воздействия электромагнитным излучением на расплавленный металл и установка для его осуществления / В.В. Крымский, Б.А. Кулаков, Л.Г. Знаменский, В.К. Дубровин В.К. // Бюл. – 2003. – № 5.

50. Патент РФ № 2209127. Способ изготовления форм и стержней на гипсовом связующем при производстве отливок из цветных и драгоценных сплавов / Знаменский Л.Г. // Бюл. – 2003. – № 21.

51.Патент РФ № 2212975. Способ приготовления смеси для изготовления форм и стержней на гипсовом связующем при производстве отливок из цветных и драгоценных сплавов / Знаменский Л.Г. // Бюл. – 2003. – № 27.

52.Патент РФ № 2214314. Способ изготовления стержней и форм на гипсовом связующем при производстве отливок из цветных и черных сплавов / Знаменский Л.Г. // Бюл. – 2003. – № 29.

53.Решение ФИПС от 23.12.2003 о выдаче патента РФ по заявке №2002133549/02(035304) с приоритетом от 10.12.2002. Способ изготовления керамических стержней по холодной оснастке в литье по выплавляемым моделям / Знаменский Л.Г.

54.Решение ФИПС от 28.02.2004 о выдаче патента РФ по заявке №2003100965/02(000781) с приоритетом от 13.01.2003. Раствор и способ химического закрепления слоев жидкостекольного покрытия в литье по выплавляемым моделям / Знаменский Л.Г.

55.Решение ФИПС о выдаче патента РФ по заявке №2003103259/02(003275) с приоритетом от 03.02.2003. Способ приготовления лигатуры алюминий–тугоплавкий металл / Знаменский Л.Г.

Соискатель

Л.Г. Знаменский

Знаменский Леонид Геннадьевич

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКТИВАЦИИ
ФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ МАТЕРИАЛОВ
И ПРОЦЕССОВ В ТОЧНОМ ЛИТЬЕ**

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

**Издательство Южно-Уральского государственного
университета**

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 23.03.2004. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ. л. 2,09. Уч.-изд. л.2.
Тираж 100 экз. Заказ 59/113.

УОП Издательства. 454080, г.Челябинск, пр. им.В.И.Ленина, 76