

05.16.04  
E698

На правах рукописи

Ердаков Иван Николаевич

ПРОЦЕССЫ ТОЧНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
В ХУДОЖЕСТВЕННОМ ЛИТЬЕ

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2001

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

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

Научный консультант – кандидат технических наук, доцент  
Л.Г.Знаменский.

Официальные оппоненты: – доктор технических наук,  
профессор Колокольцев В.М.;  
– кандидат технических наук  
Московенко А.М.

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

Защита диссертации состоится 21 декабря 2001 г., в 11<sup>00</sup> часов, в конференц-зале на заседании специализированного совета Д 212.298.06 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, тел. 39-91-23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2001 года.

Ученый секретарь  
доктор технических наук,  
профессор

 В.В. Ерофеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Представляющие большую эстетическую ценность крупногабаритные художественные изделия получают методом литья в кусковые формы с последующей чеканкой поверхности отливок. Такая технология не обеспечивает необходимое качество литой поверхности, трудоемка и низкопроизводительна, требует высокой квалификации формовщиков, трудно поддается механизации.

Экономически и технологически целесообразным представляется получать указанные отливки литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ). В настоящее время развитие этой прогрессивной технологии в области художественного литья сдерживается из-за низкой точности, термочности и повышенной склонности к трещинообразованию применяемых стержней и форм.

Успешно зарекомендовавшие себя в ЛВМ-процессе керамические стержни обладают высокой точностью и прочностью, но их очень трудно удалить из полостей художественных отливок, а гипсовые формы из импортных смесей используют только при литье мелких ювелирных отливок. Поэтому создание специальных стержней и гипсовых смесей с улучшенным комплексом свойств для художественного литья по выплавляемым моделям является весьма актуальной задачей литейного производства при получении художественных отливок. Работа выполнена по грантам 1995–2000 гг. координационного плана НИР РАН по решению актуальных проблем в области процессов литья.

**Цель и задачи исследования.** Настоящая диссертационная работа имела целью разработать новые процессы фильтрационного формообразования, приготовления высокотехнологичных гипсовых смесей и методы управления данными процессами с использованием мощного электроимпульсного воздействия для крупногабаритного художественного литья из черных и цветных сплавов по выплавляемым моделям. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- исследовать кинетику процесса фильтрации в гелеобразующих системах, активированных электроимпульсной обработкой пропитывающего раствора;
- разработать математическую модель и методы расчета фильтрационного формообразования с использованием жидкого стекла и определить оптимальные параметры процесса;
- реализовать для изготовления стержней метод фильтрации гелеобразующего связующего раствора через плакированный его отвердителем наполнитель с использованием несинусоидальных электромагнитных импульсов (НЭМИ), выбрать эффективную гелеобразующую систему;
- изучить закономерности воздействия технологических добавок на структуру и свойства гипсовых смесей, определить механизм процесса и на его основе создать математические модели;

- установить влияние электроимпульсной обработки растворов металлофосфатов на структуру и свойства гипсовых смесей, форм и определить механизм взаимодействия в системе «гипс-металлофосфатный замедлитель»;
- осуществить анализ физических и химических процессов, протекающих в гипсовых формах при нагреве, и оптимизировать их состав и параметры тепловой обработки;
- разработать и освоить в художественном литье составы и технологии фильтрационного формообразования и приготовления гипсовых смесей с использованием электроимпульсной обработки.

**Научная новизна.** Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена совокупность научных положений, обеспечивающих новые решения актуальной в области литейного производства задачи – изготовления точных, легкоудаляемых стержней методом фильтрационного формообразования и приготовления высокотехнологичных гипсовых форм с использованием электроимпульсного воздействия.

**В том числе:**

- теоретически и экспериментально обоснован новый способ формообразования стержней, основанный на фильтрации гелеобразующего связующего раствора через плакированный его отвердителем наполнитель;
- установлены кинетические закономерности фильтрации связующего раствора через плакированный наполнитель и определен оптимальный метод фильтрации связующего для изготовления стержней различных габаритных размеров и массы в условиях электроимпульсного воздействия;
- выявлены структурные превращения в связующем в процессе фильтрации через плакированный наполнитель и установлены особенности формирования прочности смеси;
- установлены закономерности воздействия технологических добавок на реологические свойства гипсовых суспензий и физико-механические характеристики форм и стержней;
- изучен механизм в системе «гипс – металлофосфатный замедлитель», обработанный НЭМИ;
- методами рентгенофазового анализа и дилатометрии осуществлен анализ процессов в гипсовых формах при нагреве;
- разработаны математические модели, методики и программы расчета на ЭВМ технологических параметров процессов.

**Практическая ценность работы.** На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны новый процесс фильтрационного формообразования и высокотехнологичные гипсовые формы в условиях электроимпульсной обработки связующего и затворителя для литья черных и цветных сплавов по ЛВМ-процессу, с последующим разупрочнением смеси и легким удалением из полостей художественных отливок. Составлены

номограммы определения оптимальных параметров изготовления форм и стержней в зависимости от их габаритных размеров и массы.

Предложены новые способы подготовки в «кипящем слое» плакированного зернистого материала (ПЗМ) и электроимпульсной активации связующего для фильтрационного формообразования и обработки НЭМИ металлофосфатного затворителя гипсовых смесей.

**Реализация работы.** Разработанные технологические процессы изготовления точных, легкоудаляемых форм и стержней для чугунного и цветного художественного литья прошли опытно-промышленные испытания и освоены на Каслинском машиностроительном заводе (ЗАО «КМЗ»), Челябинских ЗАО «Уральская бронза» и ПП «Престиж, Стабильность, Профессионализм» (ПП «ПСП»). Суммарный годовой экономический эффект составил 15 млн. рублей (в ценах июня 2000 г.).

**Апробация работы.** Материалы диссертации были доложены и обсуждены на I и II международных научно-технических конференциях «Машиностроение-97/98. Прогрессивные технологии», г. Челябинск, 1997-1998 гг., на научно-технической конференции «Новые технологические процессы в литейном производстве», г. Омск, 1997 г, на V съезде литейщиков РФ, г. Москва, 2001 г.

**Публикация.** По теме диссертации опубликованы 10 научных работ, получены 4 патента на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка литературы из 145 наименований и четырех приложений; содержит 100 страниц машинописного текста, 46 таблиц, 81 рисунок.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*В первой главе* рассмотрено современное состояние производства художественного литья, проанализированы особенности изготовления форм и стержней для получения методом ЛВМ крупногабаритных скульптурных и кабинетных художественных отливок из черных и цветных сплавов. Произведен анализ и выявлены недостатки базовых технологий изготовления форм и стержней для художественного литья методом ЛВМ. Показано, что в рамках известных методов формообразования представляется проблематичным изготовление форм и стержней, отличающихся точностью воспроизведения сложной рабочей поверхности оснастки и хорошей удаляемостью после формирования отливки. Показана возможность улучшения свойств изготавливаемых форм и стержней за счет использования несинусоидальных электромагнитных импульсов. Отмечено, что в отечественной и зарубежной научно-технической литературе практически отсутствуют данные о закономерностях влияния НЭМИ на структуру и свойства формовочных материалов и смесей. На основании этого обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи исследований.

*Во второй главе* представлен метод фильтрационного формообразования с использованием НЭМИ, который был реализован в технологическую схему

изготовления литейных стержней. В отличие от традиционных способов формообразования процесс изготовления стержня состоит из следующих этапов: подготовки наполнителя путем плакирования его гелеобразователем и пропитывающего раствора, обработанного НЭМИ; засыпки ПЗМ в оснастку и фильтрации через него связующего раствора. При этом происходит ускоренное формирование прочности смеси непосредственно в оснастке, что обеспечивает высокую точность стержней. Исходя из анализа свойств известных связующих растворов, применяемых в ЛВМ-процессе, выбрано жидкое стекло (ЖС). В качестве плакирующего состава наполнителя использован водный раствор хлорида алюминия (ХА). Выбор гелеобразующей системы «жидкое стекло – наполнитель, плакированный ХА» диктуется возможностью ускоренного получения в пористом теле коагуляционных структур (геля), обеспечивающих адгезионное «сцепление» частиц пористой среды и повышение термоч прочности изготавливаемых стержней или форм. Для улучшения пропитывающей способности связующего, и технологических свойств стержней была проведена обработка жидкого стекла НЭМИ.

Характерной особенностью НЭМИ является наличие пространственно-временного направленного действия электромагнитных сил и формирование локальных полей высокой напряженности ( $10^{10} \dots 10^{12}$  В/м). Это создает условия для целенаправленного воздействия на структуру и свойства обрабатываемых веществ. В ходе экспериментов в емкость с ЖС (ГОСТ 1308-81) плотностью  $1150 \dots 1350$  кг/м<sup>3</sup> и модулем  $2,8 \dots 3,0$  устанавливали излучатель, подключенный к генератору НЭМИ мощностью  $1 \dots 1,5$  МВт, частотой  $700 \dots 1300$  Гц, и обрабатывали связующий раствор в течение различных промежутков времени.

Влияние НЭМИ на свойства ЖС представлено в табл. 1.

Таблица 1

Влияние НЭМИ на свойства ЖС

Наименование свойств	До Обработки НЭМИ	После обработки НЭМИ в течение, мин		
		10	20	40
Кинематическая вязкость, м <sup>2</sup> /с·10 <sup>6</sup>	5,0	4,1	3,5	2,7
Удельное электросопротивление, Ом·м	1,889	1,705	0,922	0,822
Краевой угол смачивания, град.	110	80	70	55
Равновесная высота пропитки, м	0,05	0,11	0,11	0,13
Показатель преломления по прибору Аббе, ед.	1,396	1,394	1,385	1,380
Водородный показатель (рН), ед.	11,30	11,50	11,50	11,58

Воздействие НЭМИ способствует ослаблению химических связей положительно заряженных ионов натрия Na<sup>+</sup> с кремнекислородными тетраэдрами [SiO<sub>3</sub>]<sup>2-</sup> мицелл ЖС, что увеличивает в растворе концентрацию щелочи и обуславливает рост значений рН среды. Снижение удельного сопротивления ЖС,

обработанного НЭМИ, также свидетельствует о протекающем процессе ионизации. При этом разрушаются гидратные оболочки коллоидных частиц ЖС и вызывается их диспергирование, фиксируемое оптическими методами по уменьшению значений показателя преломления исследуемого раствора. Это обеспечивает снижение в 2,0...2,5 раза кинематической вязкости и значительное повышение смачивающей, адгезионной и пропитывающей способности связующего, что создает условия качественной подготовки пропитывающего связующего раствора для процесса фильтрационного формообразования, а также и для традиционных способов литья.

Особенностью процесса фильтрации связующего раствора является параллельное протекание его гелеобразования, сопровождающееся повышением вязкости ЖС. При этом на начальной стадии наблюдается эффект «разжижения» связующего в поле НЭМИ. В результате проведенных исследований получены уравнения, характеризующие изменения вязкости ЖС при воздействии НЭМИ и в процессе фильтрации раствора через ПЗМ:

$$\eta_{\text{НЭМИ}} = \eta_0 v^{\tau_{\text{ОБР}}}, \quad (1)$$

$$\eta = \eta_{\text{НЭМИ}} (1 + A\tau_{\Phi}^2), \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{НЭМИ}}$  – динамическая вязкость раствора после обработки НЭМИ, Па·с;  $\eta_0$  – исходная динамическая вязкость раствора, Па·с;  $\eta$  – вязкость связующего в процессе фильтрации, Па·с;  $A$  – коэффициент интенсивности гелеобразования связующего при его фильтрации через плакированный наполнитель, зависящий от массы отвердителя на единицу поверхности зернистого материала,  $A = (2...8) \cdot 10^{-4}, \text{с}^{-2}$ ;  $v$  – коэффициент интенсивности «разжижения» связующего при его обработке НЭМИ, зависящий от удельной мощности и частоты импульсов,  $v = 0,5...0,9$ ;  $\tau_{\Phi}$  – продолжительность фильтрации, с;  $\tau_{\text{ОБР}}$  – время обработки НЭМИ, мин.

Для адекватной оценки кинетики фильтрационных процессов в гелеобразующей системе, активированной НЭМИ, получена математическая модель

$$h = \sqrt{\frac{2K\Delta P}{\eta_{\text{НЭМИ}} \sqrt{A}}} \cdot \arctg(\sqrt{A} \tau_{\Phi}), \quad (3)$$

где  $h$  – перемещение фронта гелеобразующего раствора в плакированном наполнителе, м;  $\Delta P$  – градиент давления, Па;  $K$  – коэффициент проницаемости наполнителя,  $\text{м}^2$ .

Методика расчета технологических параметров фильтрационного формообразования с активацией пропитывающего раствора НЭМИ реализована в разработанной программе «FILTRAT.bas».

Установлен механизм формирования прочности смеси при фильтрации связующего через ПЗМ, когда в процессе продвижения ЖС в межзерновом пространстве происходит гидролиз  $\text{AlCl}_3$ , плакирующего частицы зернистого материала. В результате образуется раствор, имеющий кислую среду и уменьшающий рН фильтрующегося ЖС до 8...9 ед., что переводит связующее в об-

ласть агрегативной неустойчивости и способствует выделению геля кремниевой кислоты в зонах контакта ПЗМ и ЖС. При этом ионы  $\text{Na}^+$  связываются в хлориды  $\text{NaCl}$  и вместе с  $\text{AlCl}_3$  частично удаляются из контактной зоны в процессе принудительной фильтрации. При обработке пропитывающего раствора НЭМИ вследствие протекающей ионизации происходит более полное связывание ионов  $\text{Na}^+$  в хлориды. Оптимизированы параметры НЭМИ для подготовки связующего: удельная мощность -  $45 \dots 55 \text{ МВт/м}^3$ ; частота -  $900 \dots 1100 \text{ Гц}$ ; время обработки ЖС -  $10 \dots 15 \text{ мин}$ .

Как показали исследования пламенно-фотометрическим и фотокалориметрическим методами у профильтрованного через слой ПЗМ раствора ЖС, обработанного НЭМИ, наблюдается снижение содержания  $\text{SiO}_2$  и повышение концентрации  $\text{Na}^+$ . Об этом также свидетельствуют результаты качественного рентгенофазового анализа ЖС, профильтрованного через ПЗМ, после прокалки при  $900^\circ\text{C}$  в течении 4ч. (рис.1).

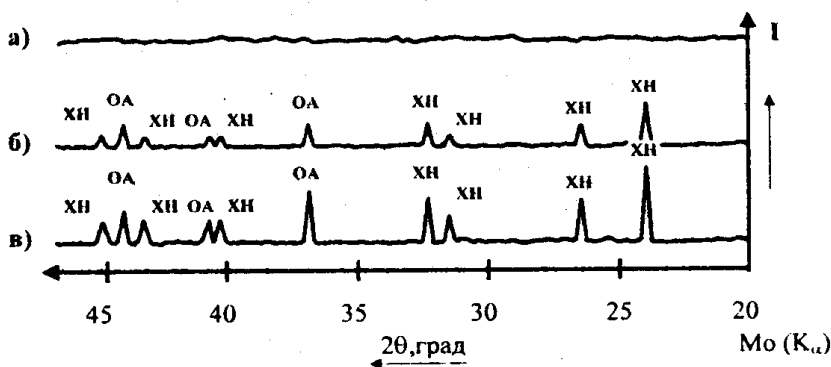


Рис.1. Дифрактограммы ЖС: а – исходное; б, в – соответственно необработанное и обработанное НЭМИ связующее после фильтрации через ПЗМ. ОА – оксид алюминия, ХН – хлорид натрия

Таким образом, при изготовлении литейных стержней способами фильтрационного формообразования к частицам наполнителя адгезирует высокомодульное ЖС и поэтому связующим является жидкостекольный гель кремниевых кислот, обедненный ионами натрия. Такая структура обеспечивает повышение прочности стержней в горячем состоянии и улучшение их выбиваемости из отливок. Достигнуты следующие физико-механические свойства стержней, полученных методом фильтрации: размерная точность -  $0,1 \dots 0,2 \%$  (отклонение от номинальных размеров), прочность стержней при  $T=700^\circ\text{C}$  после прокалки -  $1,2 \dots 1,5 \text{ МПа}$ , остаточная прочность (выбиваемость) -  $0,1 \dots 0,2 \text{ МПа}$ .

В третьей главе приведены результаты разработки новых составов и способов приготовления высокотехнологичных гипсовых смесей с использованием электронно-импульсного воздействия на затворитель. Эффективность дос-



тигнута за счет применения отходов металлургического производства - циклонной пыли шамотного производства (ЦПШП) и растворов алюмохром-фосфатного связующего (АХФС), впервые примененных в смесях на гипсовом связующем. ЦПШП обеспечивает возрастание прочности форм при изгибе на 50...60 %, увеличение их твердости на 13...19 % и уменьшение осыпаемости на 40...50 % при сушке на воздухе в течение 24ч. Использование растворов АХФС в гипсовых смесях улучшает их реологические свойства, увеличивает у форм прочность при изгибе на 20...30 %, поверхностную твердость на 12...18 % и уменьшает осыпаемость на 15...25 %.

Методом планирования эксперимента получены математические модели влияния добавок на свойства суспензий и форм:

$$Y_1 = 134,69 - 33,75x_1 + 23,13x_2 - 6,56x_3 + 31,88x_4 + 33,44x_5, \quad (4)$$

$$Y_2 = 15,03 - 8,44x_1 + 0,50x_2 - 0,16x_3 + 4,50x_4 + 5,97x_5, \quad (5)$$

$$Y_3 = 3,29 + 1,37x_1 + 1,07x_2 + 0,85x_3 - 0,41x_4 + 0,39x_5, \quad (6)$$

где  $Y_1$  – текучесть суспензии по методике Суттарда, мм;  $Y_2$  – время начала затвердевания суспензии, фиксируемое приборов Вика, мин;  $Y_3$  – прочность форм и стержней при изгибе после сушки на воздухе в течение 24 ч., МПа;  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  – соответственно количество гипса, динаса, ЦПШП, затворителя и АХФС в смеси, %<sub>масс.</sub> На основе моделей оптимизированы составы формовочных смесей для различных условий производства: состав I типа для литья мелких и средних отливок (массой до 10 кг): гипс (Г-16П) – 10...24%, динасовый порошок – 10...24%, пылевидный кварц – 16...60%, ЦПШП – 2,5...5,5%, АХФС – 0,07...0,09%, вода – остальное; состав II типа для литья крупных отливок (массой свыше 10 кг): гипс (Г-16П) – 10...24%, измельченный кварцевый песок – 50...70%, ЦПШП – 2,5...5,5%, АХФС – 0,10...0,12%, вода – остальное.

Изучено влияние НЭМИ на структуру и свойства металлофосфатных затворителей, смесей и форм на гипсовом связующем. Результаты исследований проедставлены в табл.2 и 3.

Таблица 2

Влияние НЭМИ на свойства АХФС-затворителя

Показатели	Значения показателей					
	До Обработки НЭМИ	После обработки НЭМИ в течение, мин				
		5	10	20	30	40
1.Кинематическая вязкость по ВПЖ-2, м <sup>2</sup> /с·10 <sup>6</sup>	1,0	0,9	0,7	0,7	0,6	0,6
2.Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	4,75	4,74	4,69	4,73	3,81	3,75
3.Количество осадка при выдержке 24 ч, %	22	21	18	12	8	6

4. Показатель преломления, ед.	1,385	1,385	1,377	1,342	1,269	1,251
5. Глубина капиллярной пропитки, м	0,13	0,15	0,20	0,24	0,26	0,28

Таблица 3

Влияние НЭМИ на свойства гипсо-динасовых смесей и форм

Показатели	Значения показателей					
	До обработки НЭМИ	После обработки НЭМИ в течение, мин				
		5	10	20	30	40
1. Текучесть суспензии, мм	160	165	180	185	190	190
2. Интервал затвердевания смеси, мин:						
- начало;	20	18	19	25	25	25
- конец	26	27	29	30	32	33
3. Осыпаемость, %	0,15	0,01...0,1				
4. Прочность при изгиб, МПа:						
- после сушки на воздухе	2,6	2,8	3,3	3,4	3,9	4,0
- в течение 2ч;						
- после сушки на воздухе в течение 24ч	3,8	3,9	4,2	4,6	5,0	5,1

Анализ экспериментальных данных показывает, что обработка НЭМИ понижает кинематическую вязкость затворителя в 1,1...1,7 раза, что позволяет повысить степень наполнения гипсовых суспензий и увеличить более чем на 50 % прочность и трещиностойчивость форм и стержней.

Методом планирования эксперимента получены математические модели влияния НЭМИ на свойства суспензий и форм:

$$Y_1 = 175,63 + 5,00x_1 + 3,75x_2 + 4,38x_3, \quad (7)$$

$$Y_2 = 22,38 + 1,00x_1 + 0,50x_2 + 0,63x_3, \quad (8)$$

$$Y_3 = 4,46 + 0,46x_1 + 0,09x_2 + 0,14x_3, \quad (9)$$

где  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , – соответственно удельная мощность, МВт/м<sup>3</sup>; частота, Гц; продолжительность обработки затворителя. Данные положены в основу методики расчета оптимальных параметров изготовления гипсовых форм и стержней, которая реализована в виде номограмм и компьютерной программы «GIPMASS.bas». В результате оптимизированы параметры обработки НЭМИ АХФС-затворителя: удельная мощность 80...120 МВт/м<sup>3</sup>; частота импульсов 900...1100 Гц; продолжительность обработки 15...30 мин.

Установлен механизм замедления процесса гидратации гипса при использовании металлофосфатного затворителя. Образующиеся при диссоциации и гидролизе солей фосфат-ионы диффундируют из объемной жидкой фазы затворителя на границу с твердой – частицами гипса, в результате чего в поверхностном слое возникает двойной электрический слой (ДЭС) зарядов. В соответствии с правилом Фаянса-Панета анион  $\text{PO}_4^{3-}$  является потенциалопределяющим, а внешнюю обкладку образуют  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{H}^+$ . Адсорбционная способность данных ионов увеличивается с повышением их заряда, поэтому  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Cr}^{3+}$  составляют плотную часть ДЭС,  $\text{H}^+$  – диффузионную. Чем больше будет толщина ДЭС на поверхности частиц, тем кинетически труднее диффундировать молекулам воды к частицам  $\text{CaSO}_4 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$  вследствие кулоновского взаимодействия. Благодаря этому затрудняется образование кристаллогидратов, их рост и срастание, замедляется скорость затвердевания смеси и повышается ее живучесть, что обеспечивает качественное проведение дегазации гипсовой суспензии при ее вибровacuумной обработке и заполнении опок в «АН-ТИОХ-процессе», в особенности при изготовлении крупногабаритных художественных отливок. При превышении предельной концентрации АХФС в растворе ( $C_{\text{АХФС}}$ ) 1,0...1,2 % АХФС происходит выделение газов, нарушающих целостность адсорбированного ДЭС на гипсовых частицах. Это создает условия для более быстрой диффузии молекул воды и ускорения реакции гидратации полуводного сульфата кальция и уменьшения времени затвердевания суспензии. Зависимость продолжительности затвердевания смесей из разных марок гипса от рН раствора и  $C_{\text{АХФС}}$  представлены на рис.2.

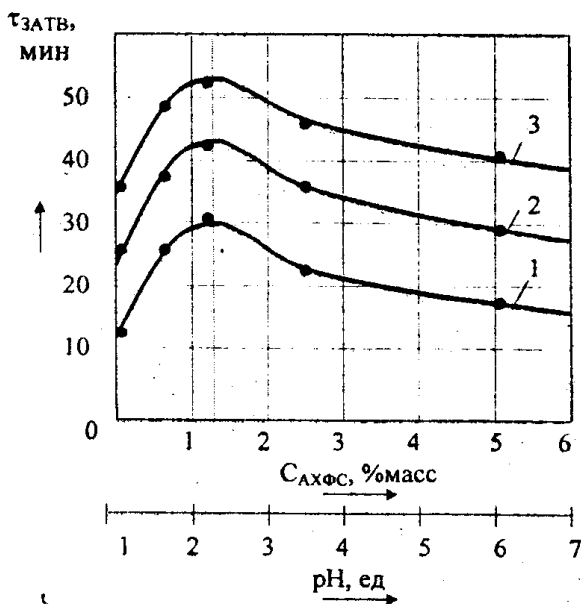


Рис.2. Зависимость продолжительности затвердевания смесей от рН раствора и  $C_{\text{АХФС}}$ .  
 Марки гипса: 1 – Г-16ША; 2 – Г-13ША; 3 – Г-11ША

Наличие гидротированных ( $e^-_{aq}$ ) и сольватированных ( $e^-_s$ ) электронов после обработки НЭМИ металлофосфатного затворителя зафиксировано методом инфракрасной спектроскопии, представленной на рис.3, где им соответствуют инфракрасные частоты  $720$  и  $740 \text{ см}^{-1}$ .

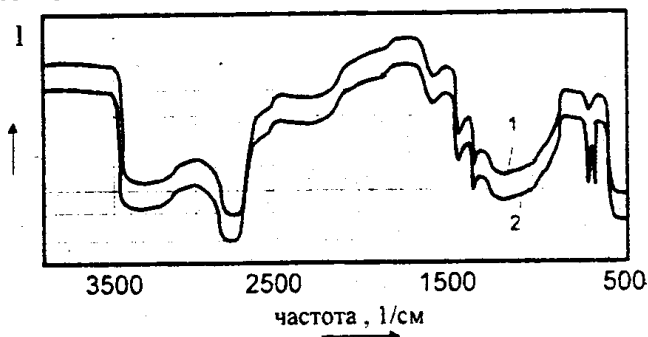


Рис.3. Влияние НЭМИ на ИК - спектры металлофосфатных затворителей:  
 1 - 0,3% раствор АХФС без обработки НЭМИ;  
 2 - 0,3% раствор АХФС, обработанный НЭМИ

Гидратированные и сольватированные электроны в процессе подготовки формовочной смеси с обработанным НЭМИ затворителем адсорбируются на частицах гипса. При этом они увеличивают толщину ДЭС и образуют дополнительный адсорбционно-сольватный барьер для диффузии молекул воды и замедляют гидратацию гипса.

Дериватографическим, дилатометрическим и рентгенофазовым анализами исследованы процессы, протекающие в разработанных смесях на гипсовом связующем при нагреве (рис.4...6).

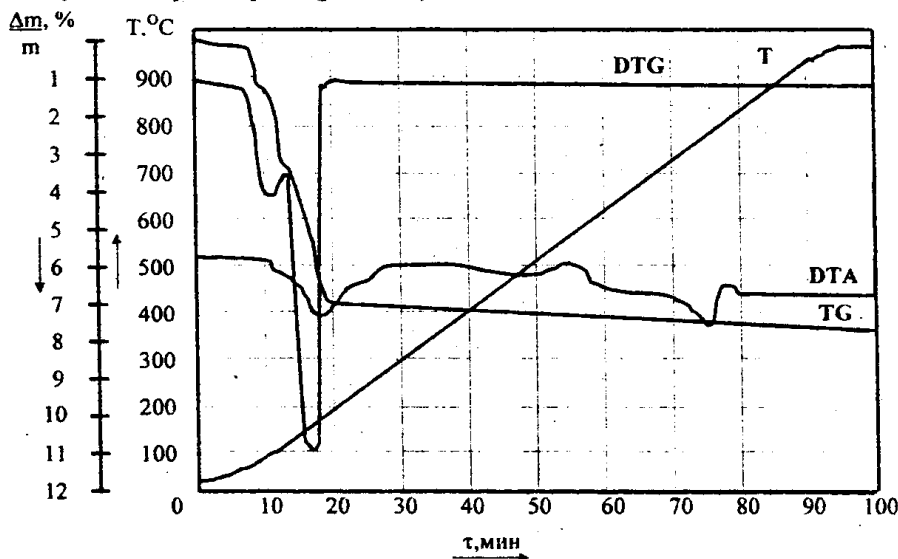


Рис.4. Дериватограмма разработанного состава гипсо-динасовой смеси

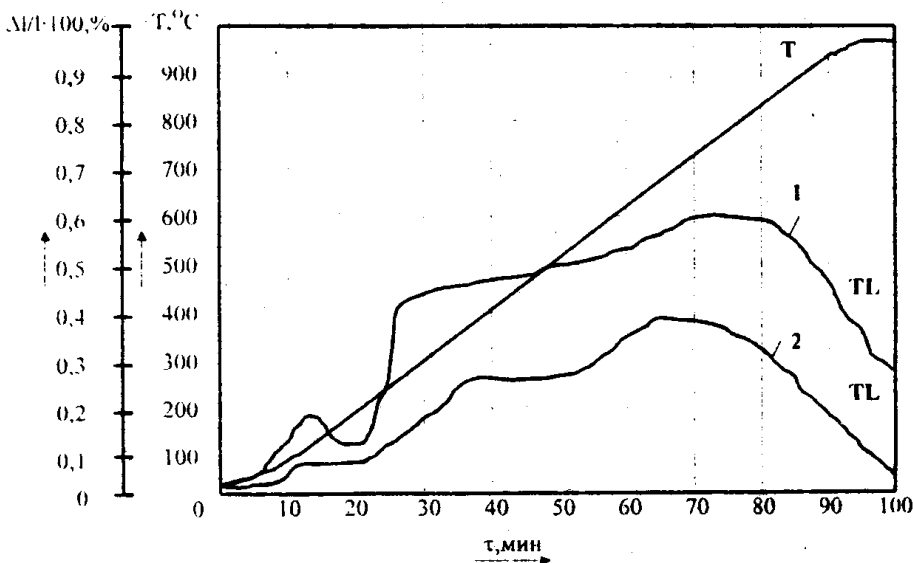


Рис.5. Дилатометрия гипсо-динасовых смесей: 1-«Ювелирная-2»; 2-разработанная

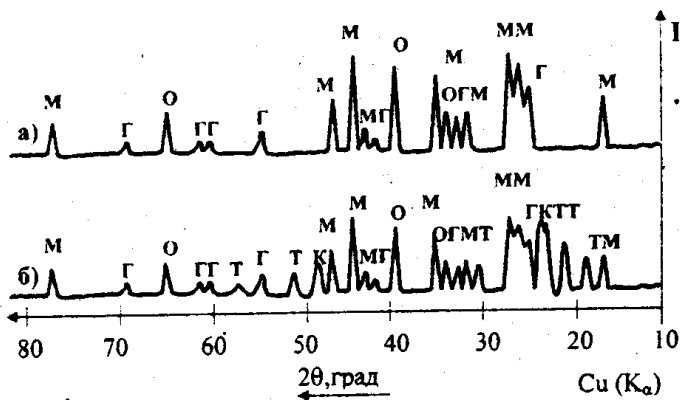


Рис.6. Дифрактограммы смесей после прокалики:  
 а – ЦПШП (20%) и гипс (80%), 800°C, 4ч;  
 б – разработанная гипсо-динасовая смесь, 800°C, 4ч.  
 М-муллит; К-кристобалит; Т – тридимит; Г-гипс;  
 О-оксид кальция

Установлено, что технологическая добавка ЦПШП в гипсовых смесях является источником муллита ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), образующегося при температурах 750...800°C под каталитическим влиянием СаО, который появляется в результате начала разложения гипса. Процесс муллитоборазования, зафиксированный дериватографическим и рентгенофазовым анализом, создает условия для повышения прочности и точности гипсовых форм в процессе их прокалики.

Результаты dilatометрии показывают, что разработанные составы формовочных смесей выгодно отличает меньшее и плавное увеличение размеров образцов при тепловой обработке. Это обеспечивает высокую трещиностойчивость форм и позволяет ускорить в 1,7...2,0 раза цикл проковки, исключив длительные выдержки и снизив энергоёмкость производства художественных отливок. Разработанные составы смесей в интервале температур 20...700 °С имеют коэффициент термического линейного расширения (КТЛР)  $0,45 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (состав I типа) и  $0,23 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (состав II типа), что в 2...4 раза меньше, чем у базовых смесей: «Ювелирная-2» (КТЛР  $0,88 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) и «Ultra-vest» (КТЛР  $0,85 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ). В результате обеспечивается повышение точности форм и художественных отливок.

В четвертой главе приведены результаты опытно-промышленных испытаний и внедрения разработанных технологических процессов точного формообразования в производстве крупногабаритных художественных отливок из черных и цветных сплавов на ЗАО «КМЗ», ЗАО «Уральская бронза» и ПП «ПСП». За счет снижения трудоемкости изготовления керамических стержней методом фильтрации, сокращения стадий операций проковки и уменьшения ее температур для гипсовых форм, а также использование недорогих и экологически безвредных формовочных материалов достигнут суммарный годовой экономический эффект в размере 15 млн. руб. (в ценах июня 2000 г.).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Комплекс условий формирования точных легкоудаляемых стержней и высокотехнологичных форм для художественного литья по выплавляемым моделям из черных и цветных сплавов обеспечивает разработанный метод фильтрационного формообразования и новые составы гипсовых формовочных смесей с металлофосфатным затворителем, а также их подготовка под действием наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ).

2. Установлено, что в рамках фильтрационного формообразования, требуемыми свойствами обладает гелеобразующая система «ЖС – песок, плакированный хлоридом алюминия». При этом повышение пропитывающей способности ЖС связующего обеспечивается обработкой его НЭМИ мощностью 1,0...1,5 МВт в импульсе при частоте 1000...1200 Гц и продолжительности воздействия 10...20 мин.

3. Ускоренный цикл подготовки ПЗМ и его максимальная текучесть достигается обработкой песка плакирующим раствором в «кипящем слое» при следующих параметрах: плотность водного раствора хлорида алюминия 1250...1270 кг/м<sup>3</sup>; количество плакирующего раствора к массе зернистого материала (ЗМ) 2...4 %; удельная скорость впрыскивания на 1 м<sup>2</sup> поверхности ЗМ  $(2...3) \cdot 10^{-5}$  кг/с; время впрыскивания – 5...10 мин.

4. Фильтрация ЖС через ПЗМ сопровождается переходом связующего в область агрегативной неустойчивости с pH = 8...9 ед. В результате через определенное время фильтрации (10...300с) начинает повышаться вязкость раство-

ра, а затем происходит необратимое превращение золя в гель, обеспечивающее прекращение продвижения ЖС в ПЗМ и формирование прочности смеси.

5. Повышение прочностных характеристик смесей в горячем состоянии и улучшение их выбиваемости достигается диспергированием под действием НЭМИ мицелл коллоидного раствора ЖС, ослаблением связи ионов  $\text{Na}^+$  с кремнекислородным тетраэдром  $[\text{SiO}_3]^{2-}$ , их связыванию в хлориды и удалению из интермицеллярной жидкости жидкостекольного геля в процессе фильтрации.

6. Получена математическая модель кинетики процесса фильтрации в гелеобразующих системах, активированных НЭМИ, в виде следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} h &= \sqrt{\frac{2K\Delta P}{\eta_{\text{НЭМИ}} \sqrt{A}}} \cdot \arctg(\sqrt{A} \tau_{\Phi}); \\ \eta &= \eta_{\text{НЭМИ}} (1 + A \tau_{\Phi}^2); \\ \eta_{\text{НЭМИ}} &= \eta_0 \cdot \tau_{\text{ОБР}} \end{aligned} \right\}$$

На основании данной модели разработана программа "FILTRAT.bas" расчета на ЭВМ оптимальных технологических параметров процесса: градиента давления, глубины капиллярной пропитки, времени обработки связующего раствора НЭМИ и продолжительность гелеобразования, обеспечивающих изготовление стержней соответствующих габаритных размеров и массы.

7. Для изготовления гипсовых форм и стержней с повышенными физико-механическими свойствами для художественного литья по выплавляемым моделям из цветных сплавов впервые применены металлофосфатные замедлители (на основе АХФС) и циклонная пыль шамотного производства (ЦПШП). Повышение текучести, продолжительности затвердевания гипсовых суспензий, необходимое для условий «Антиох-процесса», увеличение прочности и твердости получаемых форм и стержней достигается обработкой НЭМИ АХФС-затворителя.

8. Использование ЦПШП в сочетании с кварцевым наполнителем в разработанных смесях снижает в 2...3 раза их КТЛР по сравнению с лучшими отечественными и импортными формовочными массами, обеспечивая высокую точность формам и стержням. При этом достигается более «плавающее» расширение форм на стадии проковки. Это дает возможность сократить до минимума продолжительность выдержек в процессе проковки, общий цикл которой за счет этого уменьшается в 1,7...2,0 раза, а максимальная температура снижается до 500...600°C. В результате чего повышается трещиностойкость форм и стержней и уменьшается энергоемкость их тепловой обработки.

9. С повышением концентрации АХФС в затворителе возрастает толщина ДЭС на частицах гипса и соответственно замедляется процесс его гидратации. При этом рН металлофосфатных растворов составляет 5...6 ед. При больших концентрациях АХФС в затворителе, создающих рН раствора 1...3 ед., поми-

мо физической адсорбции фосфат-ионов на гипсе, происходит химическое взаимодействие, сопровождающееся выделением газов и вспениванием суспензии. В этом случае ДЭС мицелл гипсовой суспензии «разрыхляются» и процесс гидратации связующего интенсифицируется.

Установлено, что под действием НЭМИ в затворителе образуются сольватированные и гидратированные электроны, которые также увеличивают толщину ДЭС, улучшая этим в 1,5 раза смачиваемость гипса, повышая его адгезионную способность, но замедляют при этом гидратацию связующего.

10. Методом планирования эксперимента получены математические модели и составлены номограммы, позволяющие прогнозировать реологические свойства гипсовых суспензий, физико-механические характеристики форм и стержней в зависимости от количества технологических добавок в разработанных формовочных смесях, а также параметров их обработки с использованием НЭМИ. Модели реализованы в программе "GIPMASS.bas" расчета на ЭВМ оптимальных вариантов процессов формообразования для различных условий производства.

11. Разработанные электроимпульсные технологии изготовления легкоудаляемых стержней и гипсовых форм с повышенными физико-механическими свойствами освоены на ЗАО «КМЗ», ЗАО «Уральская бронза» и ПП «ПСП». Анализ ТЭП показал уменьшение более чем на 50% толщин стенок и массы художественных отливок, значительное улучшение качества их тонкорельефной поверхности, снижение в 4...5 раз трудоемкости и в 3...10 раз себестоимости производства художественного литья. Суммарный годовой экономический эффект – 15 млн. руб. (в ценах июня 2000 г.).

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Крымский В.В., Ивочкина О.В., Ермаков И.Н. Электроимпульсная обработка жидкого стекла и суспензий в точном литье // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – №3. – С.52–54.

2. Дубровин В.К., Ермаков И.Н., Ивочкина О.В. Точное формообразование в художественном литье // Литейное производство. – 2001. – № 1. – С. 32.

3. Кулаков Б.А., Крымский В.В., Ермаков И.Н. Аэрозольно-электроимпульсная обработка жидкостекольного связующего // Литейное производство. – 2001. – № 1. – С. 19-20.

4. Знаменский Л.Г., Ермаков И.Н. Металлофосфатные связующие в гипсовых смесях // Литейное производство. – 2001. – № 1. – С. 22-23.

5. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ермаков И.Н., Ивочкина О.В. Электрофизическое регулирование свойств формовочных материалов в точном литье // Сб. тр. V съезда литейщиков России/ М.: РАДУНИЦА, 2001. – С.320...322.

6. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Крымский В.В., Ермаков И.Н. Новые электрофизические методы обработки материалов в точном литье // Машино-



строение-97. Прогрессивные технологии: Тез.докл. I Междунар. научн.-техн.конф. – Челябинск, 1997. – С. 71.

7. Знаменский Л.Г., Кулаков Б.А., Ермаков И.Н., Евлевин А.С. Технология получения высокомодульного жидкого стекла по выплавляемым моделям // Новые технологические процессы в литейном производстве: Тез.докл. Всерос.научн.-техн.конф. – Омск, 1997. – С. 10.

8. Знаменский Л.Г., Ермаков И.Н., Дубровин В.К., Кулаков Б.А. Прогрессивный способ формообразования для точнолитых заготовок в машиностроении // Машиностроение-98. Прогрессивные технологии: Тез.докл. II Междунар.научн.-техн.конф. – Челябинск, 1998. – С. 57.

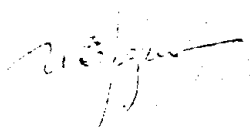
10. Патент РФ № 2129932 / Смесь для изготовления керамических форм и стержней при производстве отливок из цветных и драгоценных сплавов и способ ее приготовления / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.А. Смолко, В.К. Дубровин, И.Н. Ермаков // Бюл. №13, 1999.

11. Патент РФ № 2145265 / Способ изготовления литейных стержней и форм из жидкостекольных смесей / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.В. Крымский, А.М. Каркарин, О.В. Ивочкина, И.Н. Ермаков // Бюл. №4, 2000.

12. 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. Ермаков // Бюл. №22, 2001

13. Патент РФ ... Решение ФИПС от 30.07.01 о выдаче патента по заявке №2000125253/02 (026767) от 5.10.2000 // Смесь для изготовления форм и стержней на гипсовом связующем при производстве отливок из цветных и драгоценных сплавов / И.Н. Ермаков, Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин, С.А. Зорин, В.И. Бобер.

Соискатель



И.Н.Ермаков