

На правах рукописи

Новокрещенов Виктор Владимирович

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК
ОСОБО СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ИЗ СИЛУМИНА
ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

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

Челябинск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Ердаков Иван Николаевич.

Официальные оппоненты: Мысик Раиса Константиновна
доктор технических наук,
ФГАУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор
кафедры литейного производства и упрочняющих технологий,
Лащенко Дмитрий Дмитриевич
кандидат технических наук,
руководитель направления по металлургии
ОАО "Линде Уралтехгаз" (г. Екатеринбург)

Ведущее предприятие – ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
г.Уфа.

Защита диссертации состоится «10» июня 2014 г., в 16.00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.111.01, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», www.magtu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2014 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Селиванов Валентин Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Широкое распространение алюмокремниевых сплавов для изготовления различных деталей, а также увеличение спроса на данный вид продукции в последние 10-15 лет требуют постоянного совершенствования технологии плавки и литья алюминиевых сплавов.

По объемам применения отливок из алюминиевых сплавов лидером является машиностроительная отрасль. Из силуминов отливают блоки цилиндров, головки блоков, поршни, корпуса, а в последнее время номенклатуру дополнили детали систем управления, ходовой части, отдельные элементы кузова машин. Коллекторы новых дизельных двигателей жидкостного охлаждения 4Т 371 и 6Т 370 на перспективные тракторы серии Т4 и Т6 для промышленности и сельского хозяйства также предполагается отливать из алюмокремниевого сплава. Такая востребованность алюминиевых сплавов с кремнием в качестве основного легирующего элемента объясняется высоким уровнем эксплуатационных характеристик изготавливаемых деталей и хорошими литейными свойствами сплава такими как: низкая склонность к образованию горячих трещин, хорошая жидкотекучесть и минимальная усадочная пористость.

Однако эффективное производство алюминиевых отливок напрямую связано с высокими требованиями к качеству сплава, к размерной точности литых деталей, а также к их эксплуатационным и специальным свойствам. Высокие требования к качеству сплава определяют строгие ограничения по количеству возврата в используемой шихте и жесткий контроль химического состава сплава. Конфигурация отливки влияет на изменение линейных размеров при её затвердевании и на характер заполнения литейной полости. Получение плотной мелкозернистой структуры силумина с выделением избыточных фаз в компактной форме, особенно в условиях использования низкокачественной шихты (с повышенным содержанием железа), обеспечивает заданный уровень свойств алюминиевых изделий.

Одним из современных направлений повышения производительности труда и улучшения качества продукции является применение автоматизированных вычислений на стадии проектирования технологических процессов. Актуальным остается задача совместного использования прикладных программных пакетов и универсальных систем инженерного анализа. Среди последних ведущей является система ProCAST, позволяющая моделировать все этапы литейного производства, за исключением процесса плавки металла, с максимально возможным количеством варьируемых технологических параметров. Отсутствие в системе деформационной модели для литейной формы сдерживает ее успешное использование для автоматической разработки литейной оснастки.

Перспективным способом повышения качества литейных сплавов является воздействие на расплав наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ). Впервые воздействие на различные вещества локальными полями высокой напряженности изучалось профессорами Кулаковым Б.А., Крымским В.В., Знаменским Л.Г. и Ри Хосеном. Со временем оформились три основных направления воздействия НЭМИ: на различные водные растворы, на жидкие углеводоро-

ды, на расплавы металлов и сплавов. В указанных направлениях неизученным остается вопрос влияния НЭМИ на кристаллизующиеся сплавы металлов.

В связи с вышесказанным, создание технологий литья алюминиевых сплавов, учитывающих низкое качество шихтовых материалов, сокращающих время на подготовку расплава и разработку технологической оснастки, а также обеспечивающих повышения качества литых изделий особо сложной конфигурации с применением внешнего физического воздействия на стадии кристаллизации сплава, является актуальной задачей литейного производства.

Работа выполнена при поддержке гранта компании ССНВС EURASIA для аспирантов и молодых ученых Южно-Уральского государственного университета и отмечена именной стипендией Президента РФ.

Цель и задачи исследования. Настоящая диссертационная работа имела целью повысить качество литых алюминиевых коллекторов для двигателей внутреннего сгорания, а также разработать эффективную технологию литья отливок особо сложной конфигурации из алюмокремниевого сплава. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ известных способов литья алюминиевых сплавов, выявить особенности и недостатки технологий производства отливок из силумина особо сложной конфигурации;

- обеспечить сокращение времени на стадии подготовки расплава и разработки технологической оснастки;

- изучить гидродинамические и тепловые процессы формирования алюминиевых отливок особо сложной конфигурации типа «коллектор»;

- повысить качество литых коллекторов из силумина за счет изменения элементов литниково-питающей системы и воздействия на ход кристаллизации расплава наносекундными электромагнитными импульсами;

- провести промышленную апробацию разработанной технологии.

Научная новизна. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена совокупность научных положений, обеспечивающих новые технологические решения в производстве литых деталей особо сложной конфигурации из алюминированных кремниевых сплавов при литье в холоднотвердеющие формы.

В том числе:

- получены новые данные по физико-механическим свойствам литейных стержней из α -set смеси в процессе их скоростного нагрева (термошок), позволяющие рассчитывать значения затрудненной усадки силумина в системе ProCAST с точностью $\pm 1,5\%$;

- выявлена закономерность формирования плотной мелкозернистой структуры силумина, содержащего железа до 1,0%, при воздействии на расплав НЭМИ;

- уточнена математическая модель расчета критического размера зародыша твердой фазы при кристаллизации силумина в импульсном электромагнитном поле высокой напряженности.

Практическая ценность работы. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана технология производства отливок

особо сложной конфигурации из силумина в холоднотвердеющих формах, учитывающая повышенное содержание примеси железа в сплаве.

Компьютерные программы расчета оптимального состава шихты и данные деформационной модели стержня из α -set смеси для решателя термических напряжений в системе ProCAST позволяют существенно сократить время при подготовке расплава и проектировании литейной технологической оснастки.

Реализация работы. Разработанная эффективная технология производства отливок особо сложной конфигурации из алюмокремниевых сплавов прошла промышленные испытания в цехе опытного производства ООО «ЧТЗ – Уралтрак» (г. Челябинск) и успешно внедрена с суммарным годовым экономическим эффектом 100 000 руб.

Апробация работы. Основные материалы диссертации были представлены на 68-й межрегиональной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» при Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова (2010г.), 8-й Всероссийской научно-практической конференции (2010г.) и 9-й Международной научно-практической конференции в Санкт-Петербурге (2012г.) «Литейное производство сегодня и завтра», XXX Российской школе по проблемам науки и технологиям, посвященной 65-летию Великой Победы, при УрО РАН (2010г., Екатеринбург), II Международном конгрессе «Цветные металлы – 2010» (г. Красноярск), 9th INTERNATIONAL CONGRESS "MACHINES, TECHNOLOGIES, MATERIALS" (2012, Bulgaria), Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика литейных процессов» при СибГИУ (2012г., Новокузнецк), VII Международном симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки «Научные основы совершенствования и создания новых технологий в промышленности и энергетике» (2012г, Миасс), Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – Основа инновационного развития экономики России» ВИАМ (2012г., Москва), Materiály IX mezinárodní vědecko – praktická conference «Vědecký pokrok na přelomu tisyachalety – 2013» (Praha), 3, 4 и 5-й научной конференции аспирантов и докторантов Южно-Уральского государственного университета (2011, 2012 и 2013г.), X и XI съезде литейщиков России (2011, 2013г.г.).

На защиту выносятся следующие положения:

- методика расчета оптимального состава компонентов металлической шихты с автоматическим подбором максимально допустимого количества возврата;
- температурные зависимости изменения коэффициентов деформационной модели стержня из α -set смеси;
- экспериментальные результаты влияния НЭМИ на кристаллизующийся сплав силумина;
- параметры математической модели кристаллизации силумина в импульсном электромагнитном поле высокой напряженности;
- способ формирования отливок особо сложной конфигурации из силумина с использованием физического воздействия на ход кристаллизации сплава.

Публикации. По теме диссертации получено одно свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ, опубликовано 19 научных

статей, из них одна в иностранном журнале с системой цитирования CAS и 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 110 наименований и 4 приложений; содержит 221 страницу машинописного текста, 13 таблиц, 69 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование темы диссертации, её актуальности, представлена структура и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние производства отливок из силумина в машиностроении методом гравитационного литья в формы из ХТС, разобраны особенности и специфика изготовления литых деталей из алюминиевых сплавов. Проведен анализ и выявлены недостатки существующих технологий литья алюминиевых отливок особо сложной конфигурации.

В частности состав сплава должен точно соответствовать требованиям ГОСТ, в конструкцию литниковой системы обязательно должны быть включены фильтры, а пористость в отливках чаще всего устраняется путем пропитки деталей герметиком. К тому же автоматизированный расчет термических напряжений в отливках не позволяет количественно рассчитывать значения литейной усадки, что требует производства пробной партии отливок с последующей корректировкой размеров модельной оснастки при разработке технологии литья. Все это несомненно удлиняет технологический цикл изготовления новых отливок и повышает его трудоемкость, что негативно сказывается на эффективности производства и снижает конкурентоспособность предприятия. Отмечено, что известными технологическими решениями невозможно обеспечить заданный уровень свойств отливок особо сложной конфигурации из силумина с повышенным содержанием Fe.

На основании этого обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе определены методы и методики исследования:

1. Метод решения оптимизационных задач (симплексный);
2. Метод физико-механических испытаний (INSTRON 5882);
3. Метод металлографического анализа (ПАК Thixomet);
4. Метод электронной микроскопии (РЭМ JOEL JSM-64600LV);
5. Метод рентгенофазового анализа (ДРОН–3М);
6. Метод термометрирования процесса кристаллизации (ЭПР-09мз);
7. Метод компьютерного моделирования (CAE-система ProCAST).

В лабораторных условиях была построена графическая зависимость, позволяющая задать среднюю температуру литейного стержня при нагреве его в муфельной печи методом «термошока», аналогичную той, на которую прогревается стержень при заливке формы алюминиевым расплавом, и провести исследования физико-механических свойств образцов при данной температуре на испытательной машине INSTRON 5882.

Специально была разработана лабораторная установка для исследования кристаллизационных процессов при затвердевании сплава силумина в электромагнит-

ном поле высокой напряженности. Установка представляла литейную форму с установленными в неё излучателями импульсов в виде металлических или графитовых электродов. В ходе экспериментов формировались контрольные и экспериментальные пробы в виде цилиндров или проб для определения усадки литейных сплавов.

Пористость коллекторов оценивалась отношением суммарного пористого объема отливки к общему объему изделия, выраженного в процентах. Для отливок составляли каталог и карты дефектов. Карту дефектов получали путем нанесения контуров технически значимых дефектов в масштабе и по месту их расположения на эскиз отливки.

В третьей главе изучались особенности состава шихтовых материалов для выплавки алюминиевых сплавов на опытном производстве челябинского тракторного завода, исследовались физико-механические свойства литейных стержней при нагреве методом «термошок», влияние импульсного электромагнитного поля на процесс кристаллизации и свойства алюминиевых сплавов марки АК7ч и АК12, а также закономерности формирования отливок особо сложной конфигурации типа «коллектор» из силумина.

Отличительной особенностью состава шихты является использование возврата собственного производства порядка 50...60% и применение алюминиевого лома с варьируемым содержанием железа. При этом в целях снижения сквозной пористости в отливках и достижения необходимых механических свойств сплавов по ТУ предприятия содержание железа в расплаве не должно превышать 0,6%.

Для снятий кривых разрушения (рис. 1а) стержни, изготовленные α -set процессом на связующем марки «карбектис» ($d=20$ мм и $h=50$ мм) нагревали методом «термошока» в программируемой муфельной печи фирмы Nabertherm GmbH, а затем в течение 10 с устанавливали в испытательную машину INSTRON 5882. По специально построенной номограмме устанавливали соответствие кривой разрушения средней температуре нагретого стержня. Кривая изменения линейных размеров стержней ($d = 5$ мм, $h = 10$ мм), полученная на dilatометре фирмы PAULIK, представлена на рис.1, б. По полученным кривым в дальнейшем определяли температурные зависимости изменения модуля Юнга и коэффициента термического линейного расширения стержня.

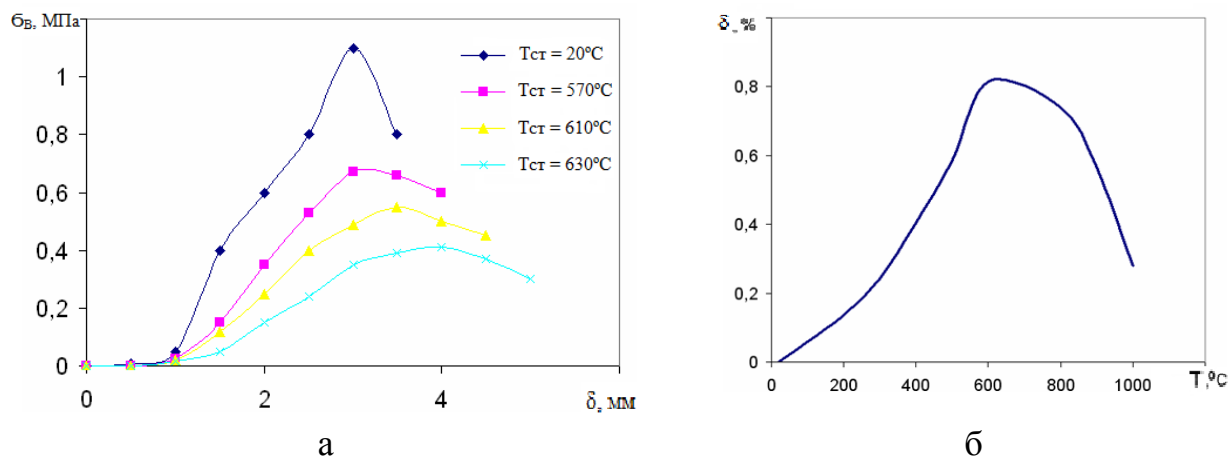


Рис. 1. Кривые разрушения стержня (а), полученного α -set процессом, и его свободная термическая деформация (б)

Экспериментальная установка для исследования влияния импульсного электромагнитного поля на формирования отливки представлена на рис. 2. Установка собиралась следующим образом. В песчано-глинистую форму вертикально заформовывались графитовые трубки с внутренним диаметром 60 мм. Внутри графитовых устанавливались кварцевые трубки (внешний диаметр 17 мм) с металлическими электродами и термопарами. В верхней части трубки фиксировались асбестовой крышкой. В установке использовался генератор импульсов марки FID-technology с параметрами генерируемых однополярных импульсов: длительность – 0,5 нс, амплитуда – 10 кВ и частота повторения – 1000 Гц.

Глубина погружения в расплав медных электродов и протяженность графитовых трубок составляли 110 мм. После рафинирования флюсом (смесь NaCl и KCl) расплав заливали в форму при температуре 700...800°C и получали цилиндрические отливки.

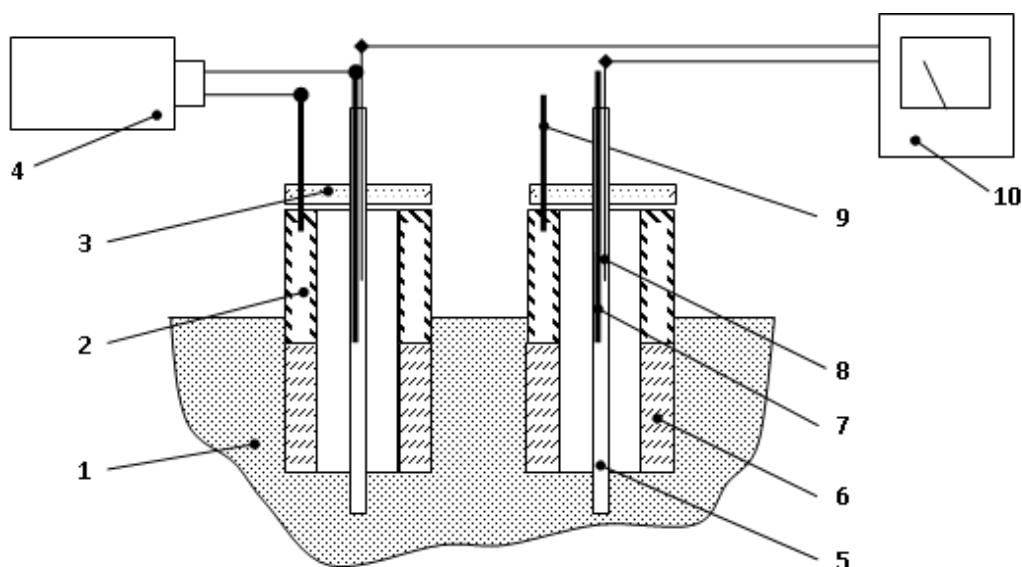


Рис. 2. Экспериментальная установка для создания электромагнитного воздействия на кристаллизующийся алюминиевый сплав: 1–песчано-глинистая форма; 2–графитовая трубка; 3–асбестовая крышка; 4–генератор НЭМИ; 5–кварцевая трубка; 6 –кварцевая втулка; 7, 9– металлические электроды; 8–термопара; 10–милливольтметр

Для проведения металлографического анализа литой структуры силумина из цилиндров вырезались пластины толщиной 10 мм вдоль оси установки кварцевой трубки. Полученные пластины разрезали на две части и маркировались: 1 – контрольный верхний; 2 – контрольный нижний; 3 – экспериментальный верхний; 4 – экспериментальный нижний.

Анализ макроструктуры выявил, что наибольшее уменьшение размера зерен, порядка 10...12%, произошло в структуре образца №3. Кроме того в этом же образце отсутствовала пористость.

Растровой электронной микроскопией установлено отсутствие микропор в экспериментальных образцах, уменьшение значений среднего размера дендритных ячеек α -фазы (d): в образце №3 d уменьшился на 15%, в образце №4 – на 9%. Микроструктуры образцов №1, 2, 3 и 4 из сплава АК7ч изображены на рис. 3.

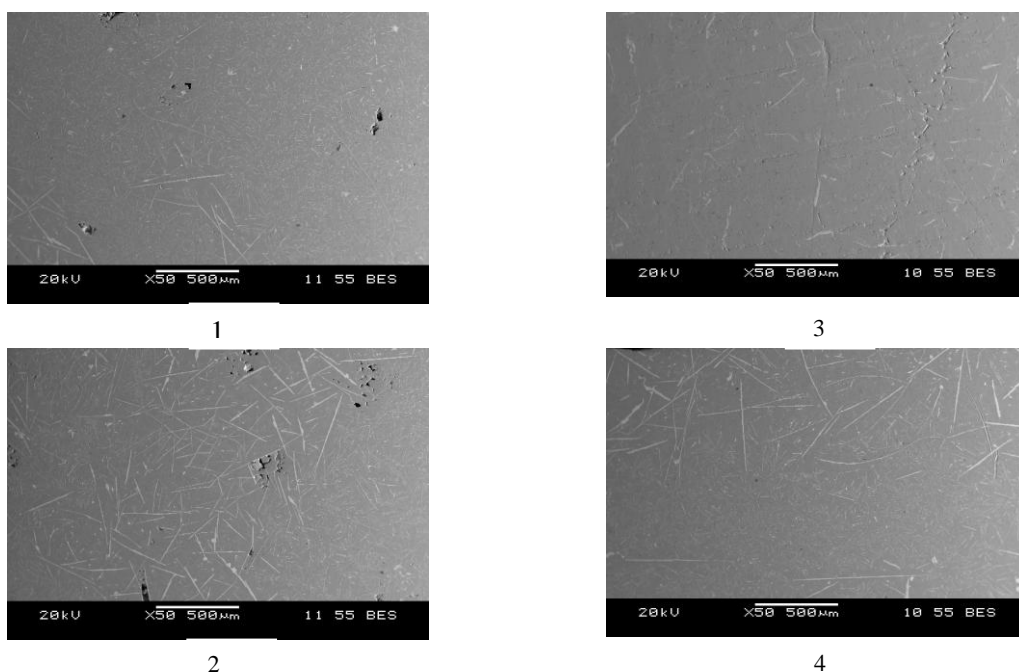


Рис. 3 Микроструктуры образцов №1, 2, 3 и 4 из сплава АК7ч

В ходе исследования вопроса глубокой переработки сырья и повышения качества алюминиевых сплавов из низкосортных шихтовых материалов изучалось влияние наносекундного электромагнитного воздействия на кристаллизующийся сплав силумина с варьируемым содержанием железа 0,5...1,5 %.

Фотографии макропористости и микроструктур экспериментальных образцов №1, 2, 3 и 4 из сплава АК7ч с содержанием железа в количестве 1,5 % представлены на рис. 4 и 5, соответственно.

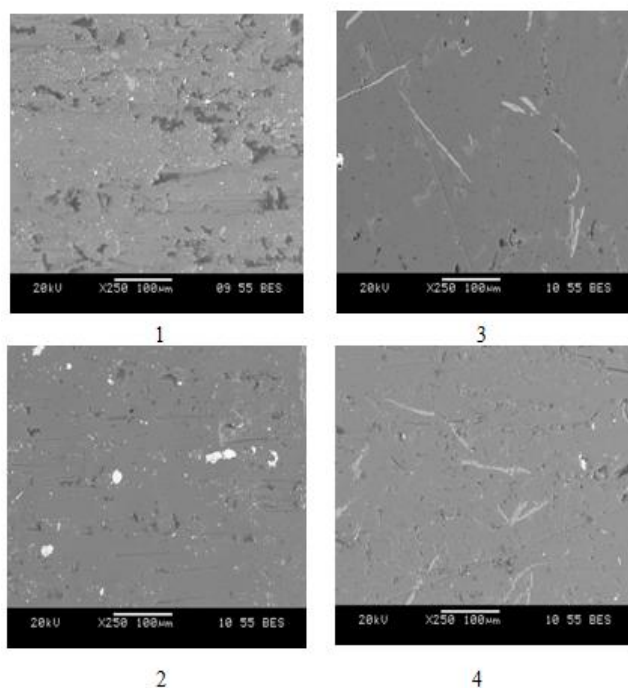


Рис. 4. Микроструктура образцов №1, 2, 3 и 4 из сплава АК7ч с содержанием Fe 1,5 %

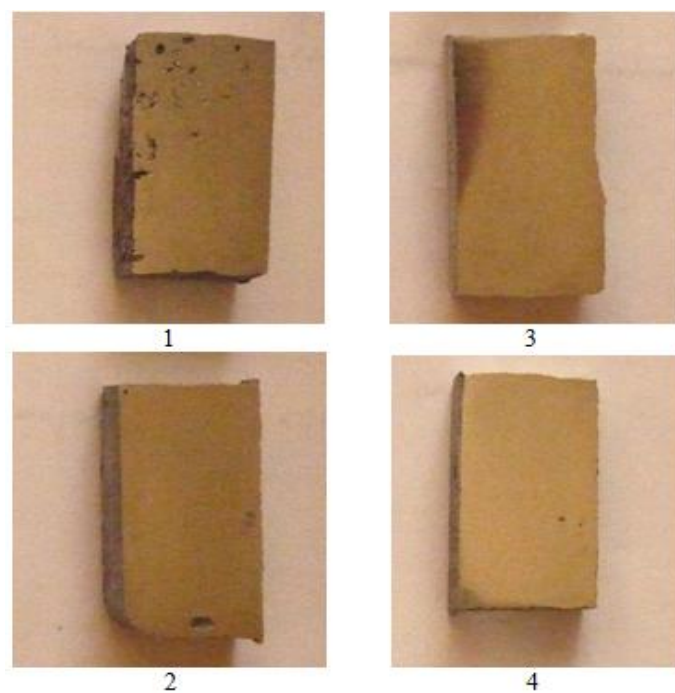


Рис. 5. Макропористость в образцах №1, 2, 3 и 4 из сплава АК7ч с содержанием Fe 1,5 %

На фотографиях (см. рис. 4 и 5) видно, что рыхлая структура контрольных образцов устраняется, если сплав формируется в поле НЭМИ. При этом наличие плотной структуры в образце №3 свидетельствует об эффективном воздействии НЭМИ только на тот объем расплава, который находится между излучателями. Снижение среднего размера дендритных ячеек α -фазы в образцах №3 и №4 составило 12% и 5%, соответственно.

В условиях литейного цеха ООО «ЧТЗ-Уралтрак» с помощью заливки клиновидной пробы установили объем эффективного воздействия НЭМИ на свойства кристаллизующегося силумина, который составил 300...500 см³.

Результаты измерения физико-механических свойств сплава АК7ч в «эффективном» объеме клиновидной пробы представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Физико-механических свойств сплава АК7ч в «эффективном» объеме клиновидной пробы

Тип образца	T _{зал} =700°C			T _{зал} =740°C			T _{зал} =800°C		
	σ_t , МПа	σ_B , МПа	δ , %	σ_t , МПа	σ_B , МПа	δ , %	σ_t , МПа	σ_B , МПа	δ , %
контрольный	159	115	1,3	145	111	1,2	131	105	1,1
экспериментальный	172	138	1,3	196	155	1,3	223	164	1,2

Таблица 2

Поверхностная твердость сплава АК7ч в «эффективном» объеме клиновидной пробы

Тип образца*	Поверхностная твердость в зависимости от расстояния от активного электрода, НВ					
	50 мм	100 мм	150 мм	200 мм	250 мм	300 мм
контрольный	84	81	79	80	81	83
экспериментальный	97	95	94	92	93	95

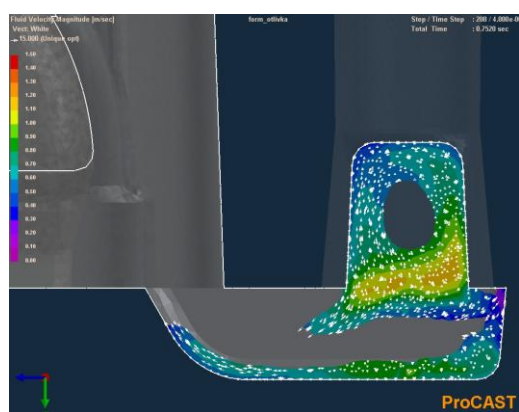
* температура заливки сплава составляла 740°C

Для исследования закономерности формирования алюминиевых отливок особо сложной конфигурации изучали вариант литья выпускного коллектора к новому тракторному дизельному двигателю марки 4Т 371. В ходе экспериментов расплав силумина марки АК7ч рафинировали хлористыми солями натрия и калия.

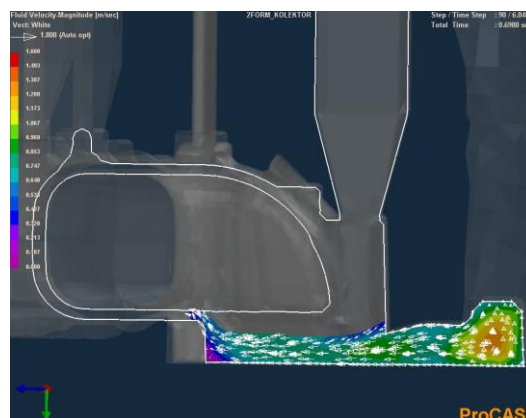
Анализ способа заполнения формы проводился в системе инженерного анализа литейных процессов ProCAST с последующей заливкой форм в цехе. В ходе экспериментов варьировали конструкцию литниковой системы, установку прибылей и холодильников. Изучалось два варианта технологии. В первом случае литниковая система имела две ветви шлакоуловителя, подвод питателей осуществлялся к донной части отливки, а на протяженные боковые стенки устанавливались массивные внешние холодильники. Во втором случае была задействована одна ветвь шлакоуловителя, питатели подводили к боковой стенке отливки и использовались внутренние холодильники.

В первом варианте технологии литья коллекторов выявлена наибольшая интенсивность перемешивания расплава в каналах литниковой системы, определена область захвата воздуха и зафиксировано отсутствие направленности затвердевания отливки, рис. 6 а, в, д.

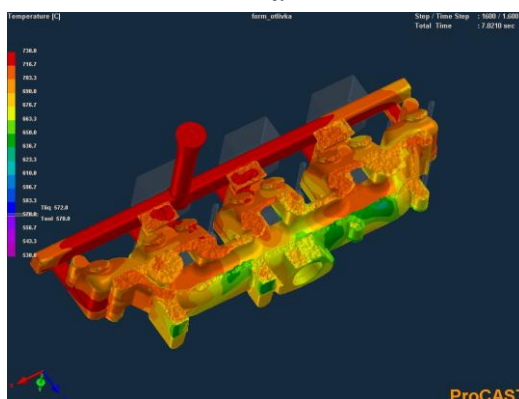
Второй вариант подвода металла к отливке существенно снижает образование оксидных плен, обеспечивает плавное заполнение полости литейной формы и направленность затвердевания сплава, позволяя максимально снизить образование сквозной пористости во всем объеме отливки за исключением зоны в верхней части коллектора, рис. 6 б, г, е.



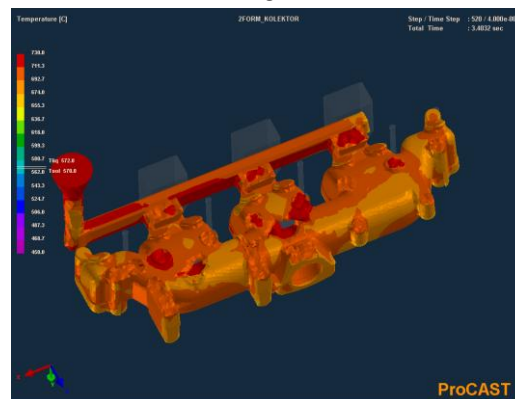
а



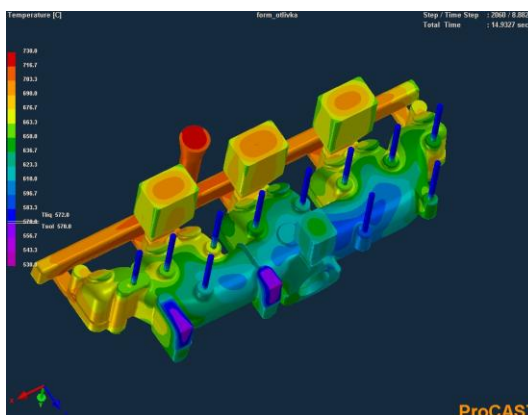
б



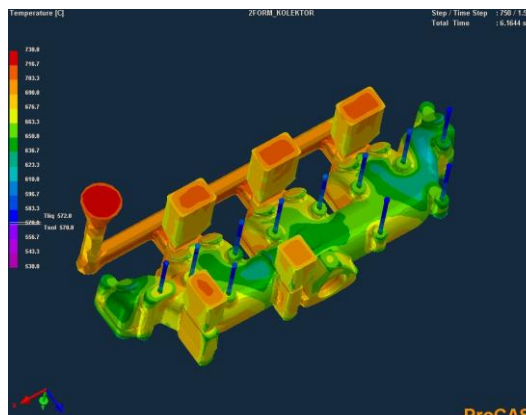
в



г



д



е

Рис. 6 Результат компьютерного моделирования процесса литья отливки «коллектор» в ProCAST: заполнение литниковой системы, захват воздуха и остывание отливки в базовом (а) и экспериментальном (б) вариантах

Результаты измерения пористости экспериментальных коллекторов

Вариант технологии*	Пористость отливки «коллектор», %		
	верхняя часть поверхности отливки	боковые части поверхности отливки	нижняя часть поверхности отливки
базовый	43	18	4
экспериментальный	23	12	0

* температура заливки сплава во всех вариантах составляла 730...750°C

В дальнейших исследованиях к экспериментальному варианту технологии литья коллекторов через систему выпоров расплав обрабатывали импульсным электромагнитным полем. Схема подключения электродов при импульсной электромагнитной обработке показана рис. 7.

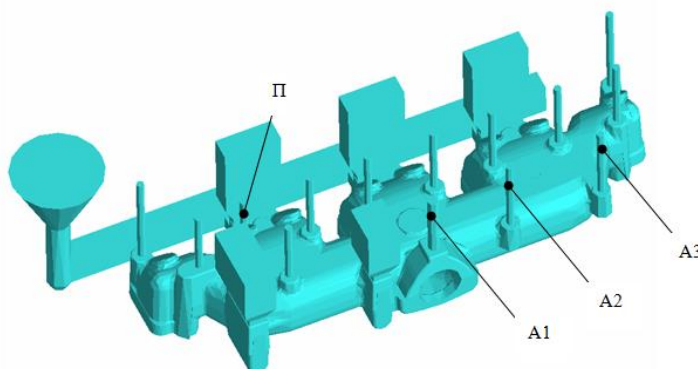


Рис. 7 Схема подключения электродов при импульсной электромагнитной обработке затвердевающей отливки «коллектор»: П–пассивный электрод; А–активный электрод (три варианта подключения)

Меняли только место подвода активного (А) электрода. Место установки пассивного (П) электрода было фиксированным. Результаты измерения пористости коллектора, сформированного в импульсном электромагнитном поле, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерения пористости коллектора, сформированного в импульсном электромагнитном поле

Вариант установки излучателей*	Пористость отливки «коллектор», %		
	верхняя часть поверхности отливки	боковые части поверхности отливки	нижняя часть поверхности отливки
контрольный	26	8	0
вариант – А1	5	2	0
вариант – А2	11	2	0
вариант – А3	18	3	0

* температура заливки сплава во всех вариантах составляла 730 ...750°C

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что направленным импульсным физическим воздействием на кристаллизующийся силумин можно существенно снизить пористость в отливке.

В четвертой главе предложена методика формирования симплекс-таблиц с поиском максимально допустимого количества возврата, создана деформационная модель литейного стержня из α -set смеси, определены закономерности затвердевания силумина в импульсном электромагнитном поле высокой напряженности.

Отличительной особенностью в предложенной методике формирования симплекс-таблиц является последовательный поиск минимальной стоимости шихты при определенном количестве возврата вплоть до полного перебора от 0 до 100%. Из всех найденных оптимальных решений лучшим считается то, в котором значение целевой функции минимально. Даная методика реализована в блок-схему решения оптимизационной задачи.

В результате анализа экспериментальных данных получены параметры деформационной линейно-упругой модели стержня из α -set смеси. В базу материалов системы ProCAST были введены температурные зависимости изменения модуля Юнга, коэффициента термического линейного расширения и коэффициента Пуассона, после чего произведен расчет затрудненной усадки силумина для технологической пробы (рис. 8).

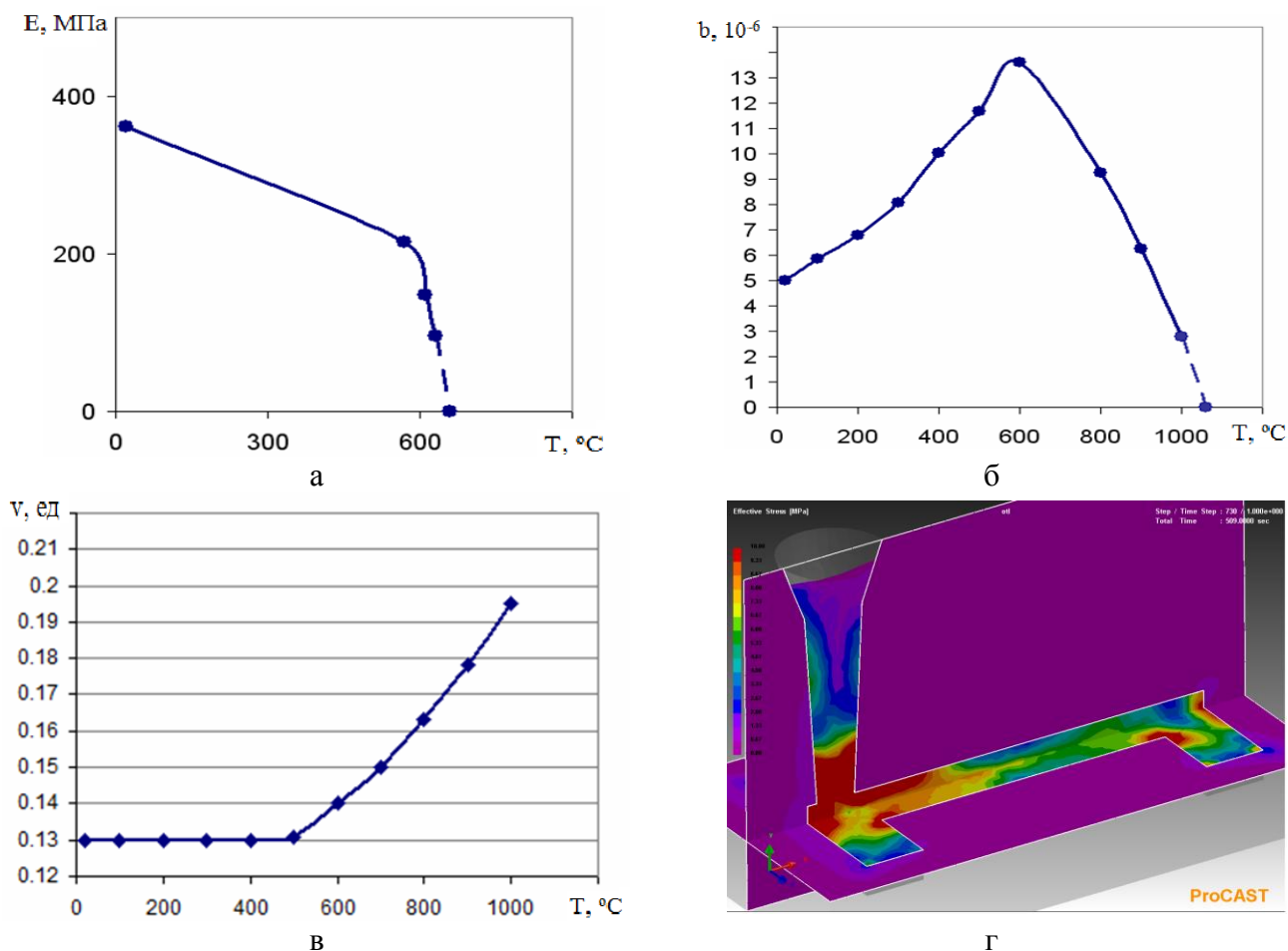
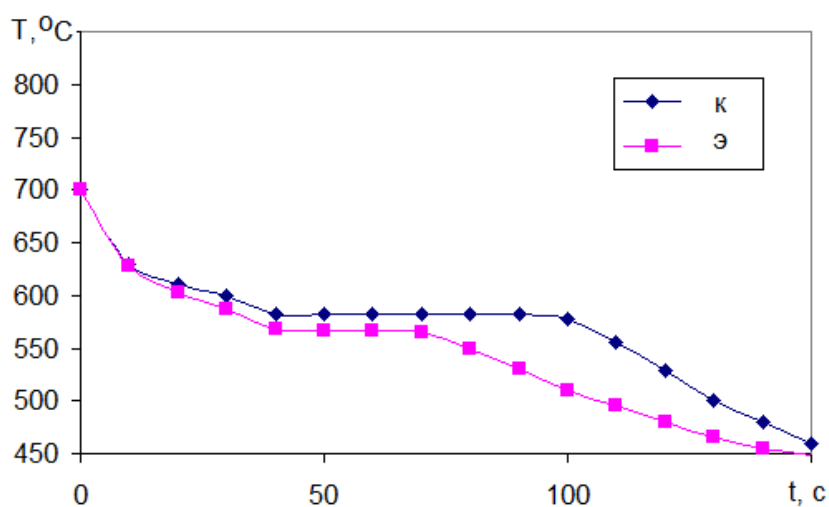


Рис. 8 Параметры деформационной модели литейной формы, полученной α -set процессом: а – данные изменения модуля Юнга; б – данные изменения КТЛР; в – данные изменения коэффициента Пуассона; г – расчет затрудненной усадки сплава в ProCAST

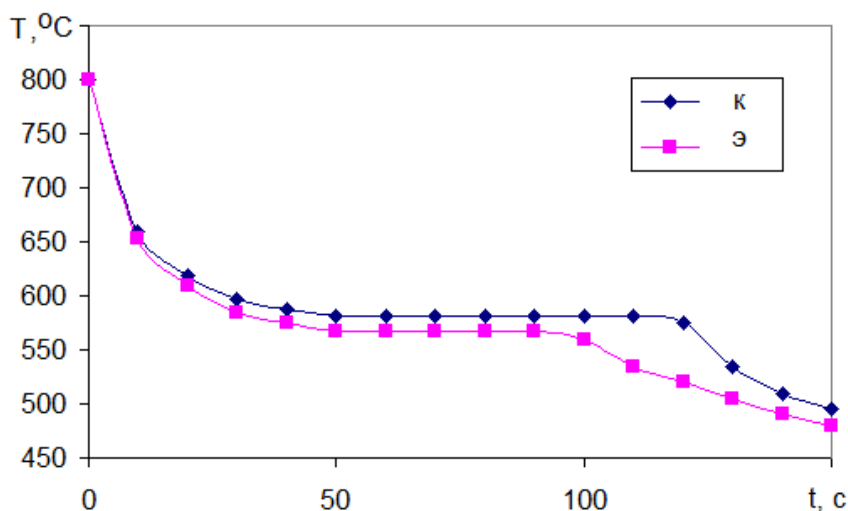
Моделирование термических напряжений и перемещений для сплава АК7ч и формы из α -сет смеси показал абсолютное совпадение расчетных линейных размеров технологической пробы с фактическими.

Для изучения закономерности затвердевания силумина в поле НЭМИ был проведен рентгенофазовый анализ экспериментальных образцов и термометрирование процесса кристаллизации сплавов (рис. 9).

Анализ экспериментальных данных показывает, что затвердевание силумина под действием импульсного электрического поля протекает в условиях переохлаждения сплава с замедленным выделением эвтектического кремния и выделением железистой фазы в компактной форме. В направлении к активному электроду формируется плотная мелкозернистая структура сплава. Повышение температуры заливки с 700 до 800°C приводит к увеличению физико-механических свойств кристаллизующегося в электромагнитном поле сплава.



а



б

Рис. 9. Результаты термометрирования образцов из сплава АК7ч:
а – $T_{зал}=700^{\circ}\text{C}$; б – $T_{зал}=800^{\circ}\text{C}$; к– контрольный расплав; э– экспериментальный расплав

Рассматриваемое физическое воздействие «разрыхляет» расплав, уменьшает размеры кластеров, приводит к снижению температуры кристаллизации, и поляри-

зует двойной электрический слой на поверхности первоначально образовавшихся зародышей. Образующиеся вследствие этого диполи расплава своим полем снижают потенциальную энергию электронов, зарождающихся твердых частиц в ближайших объемах расплава и уменьшают работу выхода электронов из зародыша. В итоге уменьшается контактная разность потенциалов на границе фаз, критический размер зародыша становится меньше. Это приводит к массовому росту центров кристаллизации и измельчению зерна.

На основании установленной закономерности уточнена математическая модель расчета критического размера зародыша твердой фазы кристаллизующегося в поле НЭМИ силумина.

$$\left. \begin{aligned} P_{уд} &= \frac{P_{ср}}{L_{эд}} \\ t_{кр}^* &= t_{кр} - k_3 P_{уд} \\ \Delta\varphi_{ж-тв} &= k_1 P_{уд} \\ \Delta T^* &= k_2 P_{уд} + \Delta T \\ r_{кр} &= \frac{C(\varphi_{ж-ст} - \Delta\varphi_{ж-тв})T_0}{\rho L \Delta T^*} \end{aligned} \right\}$$

В модели использованы следующие обозначения: $P_{ср}$ – средняя мощность излучения; $L_{эд}$ – расстояние между электродами; $P_{уд}$ – средняя мощность излучения; $t_{кр}$ – интервал кристаллизации; $\Delta\varphi$ – контактная разность потенциалов на границе фаз; ΔT – степень переохлаждения расплава; T_0 – температура фазового перехода расплава; ρ – плотность сплава; L – теплота фазового перехода расплава; C, k_1, k_2, k_3 – эмпирически подобранные константы, зависящие от типа сплава.

За счет ускорения процесса затвердевания сплава значительно сокращается выделение водорода при распадении комплексов $(Al_2O_3)_xH$ или $((Al_2O_3)_xH_2O)_yH$. Последние образуются при недостаточно качественном рафинировании силумина в значительной степени насыщаемого окислами возврата, а также в момент интенсивного перемешивания расплава на стадии заполнения формы.

В пятой главе написана компьютерная программа расчета оптимального состава компонентов металлической шихты и осуществлена корректировка температурной зависимости изменения модуля Юнга для литейного стержня из α -set смеси. Точность расчета затрудненной усадки для алюминиевых отливок новых тракторных двигателей составила $\pm 1,5\%$. За счет снижения брака, устранения сквозной пористости, уменьшение расхода анаэробного герметика для пропитки отливок, сокращения времени на подготовку шихты и проектирование литейной оснастки суммарный годовой экономический эффект при внедрении разработанной технологии на опытном производстве ООО «ЧТЗ-Уралтрак» составил 100 000 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика формирования симплекс-таблиц с последовательным поиском минимальной стоимости шихты при максимально возможном количестве возврата. Согласно методике последовательно задается процент возврата, определяется область допустимых решений и решается оптимизационная задача. Из всех найденных решений оптимальным считается то, в котором стоимость шихты минимальна. По методике составлена блок-схема и написана компьютерная программа «Расчет оптимального состава компонентов металлической шихты». Программа предоставляет технологу возможность использовать готовую базу данных компонентов шихты, а также пополнять ее новыми материалами.

2. В результате экспериментальных исследований получены температурные зависимости коэффициентов деформационной линейно-упругой модели литейного стержня из α -сет смеси. Для базы материалов системы ProCAST получена деформационная модель ХТС-смеси, позволяющая рассчитывать значения литейной усадки отливок из силумина любой конфигурации с точностью $\pm 1,5\%$.

3. В ходе исследований зафиксировано влияние наносекундных электромагнитных импульсов на ход кристаллизации алюмокремниевого сплава. Кристаллизация силумина в поле НЭМИ (длительность импульса 0,5 нс, амплитуда импульса 10 кВ, частота следования импульсов 1000 Гц) в интервале температуры заливки от 700 до 800°C приводит к измельчению зерна на 10...15%, снижению пористости в 2...3 раза, повышению предела прочности на 5...8 % и твердости на 7...12%. Установлено, что обработка кристаллизующегося сплава импульсным электромагнитным полем позволяет повысить герметичность отливок из сплава АК7ч и полностью устранить в них сквозную пористость при содержании железа в сплаве до 1% включительно.

4. Инженерным анализом в системе ProCAST и фактическими заливками форм в цехе опытного литья ЧТЗ-Уралтрак установлена рациональная конструкция литниково-питающей системы, позволяющая существенно сократить и локализовать пористость в алюминиевых отливках особо сложной конфигурации типа «коллектор». Устранение образования сквозной пористости в проблемной зоне коллектора при переплаве низкокачественной шихты, содержащей железо до 1 %, достигнуто воздействием НЭМИ на расплав через систему выпоров.

5. Рассматриваемое физическое поле «разрыхляет» расплав, уменьшает размеры кластеров, приводит к снижению температуры кристаллизации, и поляризует двойной электрический слой на поверхности первоначально образовавшихся зародышей. Своим полем диполи расплава снижают работу выхода электрона из зародыша и потенциальную энергию электронов, зарождающихся твердых частиц в ближайших объемах расплава. В итоге уменьшается контактная разность потенциалов на границе фаз, критический размер зародыша становится меньше. Это приводит к образованию большого числа центров кристаллизации и сокращению времени кристаллизации. Вследствие этого зерно силумина измельчается.

6. В интерметаллиде Al_xSiFe ионы Al и Si несут избыточный положительный заряд, а ионы Fe – отрицательный заряд. При обработке сплава НЭМИ на железистую фазу действуют разнонаправленные силы, которые препятствуют образованию её кристаллической решетки и способствуют росту кристалла в компактной

форме. Сокращение интервала кристаллизации предотвращает выделения водорода, образующегося при распадении гидрокомплексов $(Al_2O_3)_xH$ или $((Al_2O_3)_xH_2O)_yH$. Последние формируются в ходе некачественного рафинирования сплава и в момент его интенсивного перемешивания на стадии заполнения формы. Мелкозернистая структура, компактная форма железистой фазы и отсутствие пористости в металле обеспечивает рост значений прочности и твердости сформированного в поле НЭМИ сплава.

7. В результате внедрения в опытное производство ООО «ЧТЗ-Уралтрак» разработанной технологии достигнут годовой экономический эффект в размере 100000 руб. Эффективность новой технологии достигается сокращением времени на расчет шихты и разработку технологической оснастки, снижением пористости отливок и сведением к минимуму операции пропитки отливок, подвергающихся по ТУ гидроиспытаниям.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Ермаков, И.Н. Применение генератора наносекундных электромагнитных импульсов в технологическом процессе изготовления отливок / И.Н. Ермаков, В.В. Новокрещенов // Литейные процессы: межрег. сб. научн. тр. под ред В.М. Колокольцева. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. – С. 123-125.

2. Ермаков, И.Н. Контроль технологических параметров электроимпульсного процесса формирования отливки / И.Н. Ермаков, В.В. Новокрещенов // Литейное производство сегодня и завтра: тезисы докладов 8-й Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 148 – 152.

3. Ермаков, И.Н. Влияние импульсного электрического воздействия на кристаллизацию силумина (АК7ч) и стали (20ГЛ) / И.Н. Ермаков, В.В. Новокрещенов // Литейные процессы: межрег. сб. научн. тр. под ред В.М. Колокольцева. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. – Вып. 9.– С. 54-57.

4. Ермаков, И.Н. Кристаллизация алюминиевого сплава в импульсном электромагнитном поле / И.Н. Ермаков, В.В. Новокрещенов // Цветные металлы: сб. докладов второго международного конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2010. – С. 670-672.

5. Знаменский, Л.Г. Электроимпульсная обработка кристаллизующихся расплавов в литейных процессах / Л.Г. Знаменский, И.Н. Ермаков, В.В. Ерофеев, В.В. Новокрещенов // Наука и производство: сборник научных трудов / под. ред. В.В. Ерофеева. Челябинск: ЧРО РАЕН, 2010. – С. 17-22.

6. Ермаков, И.Н. Импульсное электромагнитное воздействие на кристаллизационный процесс силумина (АК7ч) / И.Н. Ермаков, В.В. Новокрещенов // Литейщик России. – 2011. – № 7. – С. 22 – 23.

7. Ермаков, И.Н. Влияние температуры заливки на кристаллизацию алюминиевого сплава в импульсном электромагнитном поле / И.Н. Ермаков, В.В. Новокрещенов // Труды X съезда литейщиков России, Казань, Изд-во РАЛ, 2011г. – С. 216-219.

8. Ермаков, И.Н. О кристаллизации алюминиевого сплава в импульсном электромагнитном поле / И.Н. Ермаков, В.В. Новокрещенов // Литейное производство – 2012. – № 2. – С. 34–35.

9. **Ердаков, И.Н. Методика формирования литой структуры металлического сплава в электромагнитном поле высокой напряженности / И.Н. Ердаков, В.В. Новокрещенов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 3. – С. 7 – 10.**

10. **Ердаков, И.Н. Специфика формирования отливки при электроимпульсном воздействии / И.Н. Ердаков, В.В. Новокрещенов // Литейное производство – 2012. – № 10. – С. 21–22.**

11. Особенности затвердевания силумина, находящегося в импульсном электромагнитном поле / И.Н. Ердаков, В.В. Новокрещенов, В.Ю. Усанов и др. // сб. фундаментальных и прикладных проблем науки: материалы VII Международного симпозиума, М: РАН, 2012.– С. 83–90.

12. Новокрещенов, В.В. Математическая модель кристаллизации металлического сплава в импульсном электромагнитном поле / В.В. Новокрещенов, И.Н. Ердаков // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр./ под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2012. – Вып. 12. – С.169–173.

13. Ердаков, И.Н. Технология производства высококачественных литых деталей из алюминиевых сплавов / И.Н. Ердаков, В.В. Новокрещенов // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр./ под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2012. – Вып. 12 – С.97–100.

14. **Новокрещенов, В.В. Локальная электроимпульсная обработка кристаллизующегося алюминиевого сплава / В.В. Новокрещенов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – №39. – С. 134–136.**

15. **Erdakov I.N., Novokreshchenov V.V. A principal approaching design of resource-seving casting technologies. Mashines, technologies, materials, 2013, n. 2, pp. 13–15.**

16. Современный подход к повышению эффективности технологии изготовления отливки / И.Н. Ердаков, В.В. Новокрещенов, Д.А. Кольцо, А.О. Оводов // Теория и практика литейных процессов: труды всероссийской научно-практической конференции / Под ред. И.Ф. Селянина, В.Б. Деева. – Новокузнецк: Издат. центр СибГИУ, 2012. – С. 143–144.

17. **Новокрещенов, В.В. Производство высококачественных литых деталей из алюминиевых сплавов / В.В. Новокрещенов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2013. – Т.13. – №1. – С. 208–210.**

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ – 2013611738. Расчет оптимального состава компонентов металлической шихты / М.А. Иванов, В.В. Новокрещенов; Южно-Уральский государственный университет. – №2012661366; Заяв. 19.12.2012; Зарег. 04.02.2013.

19. Ердаков, И.Н. Технология литья коллекторов в условиях опытного производства челябинского тракторного завода / И.Н. Ердаков, В.В. Новокрещенов // Труды XI съезда литейщиков России, Екатеринбург, Изд-во РАЛ, 2013. – С. 105–109.