

ДРОКИНА ВАСИЛИНА ВАСИЛЬЕВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ
АЛЮМИНИЕВЫХ ОТЛИВОК В ФОРМАХ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ МЕТОДОМ
ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ, С ЦЕЛЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ RP – ТЕХНОЛОГИЙ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Специальность 05.16.04. - "Литейное производство"

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Диссертационная работа выполнена на кафедре технологии литейных
Процессов Национального исследовательского технологического
университета «МИСиС»

Научный руководитель

Заведующий каф. ТЛП НИТУ МИСиС,
профессор, д.т.н.

Белов Владимир Дмитриевич

Официальные оппоненты:

Заведующий кафедрой Технологии
металлов и литейных процессов МГОУ,
профессор, д.т.н.

Батышев Александр Иванович

Зам отдела ОКНТП
ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ», к.т.н.

Филиппов Сергей Федорович

Ведущая организация: ОАО «АК «РУБИН»

Защита состоится **10 марта 2011 года** в 10 часов на заседании диссертационного совета Д.212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, ауд. А-305.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Ученый Совет.

Копии отзывов можно прислать по факсу: (495)951-17-25, а также на e-mail: vdbelov@mail.ru, drokina.vv@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Автореферат разослан 9 февраля 2011 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.132.02
доктор технических наук, профессор

 **А.Е. Семин**

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В последнее десятилетие литейные производства практически на всех предприятиях машиностроительных и металлургических отраслей России развивались по экстенсивному пути. Главная причина – перестройка и экономический кризис. В настоящее время выход из экономического кризиса является приоритетной задачей государства.

В области литейного производства России выйти из него можно только за счёт интенсивного освоения инновационных технологий на базе прогрессивного оборудования, импортируемых из других промышленно развитых стран. Последнее связано с тем, что в настоящее время производство литейного оборудования в России практически свернуто.

Однако хорошо известно, что простой перенос таких технологий не всегда эффективен и возможен. Требуется проведение специальных исследований и разработка методик по их адаптации к конкретным условиям отечественного производства.

К числу новейших технологий, которые произвели переворот в машиностроительных отраслях во многих странах мира не только в изготовлении, но и в проектировании изделий, относятся технологии быстрого прототипирования (RP-технологии), в основе которых лежат компьютерные технологии. Применение их на предприятиях промышленно развитых стран в самых различных отраслях производства позволяет решать многие, не только технические, но и экономические задачи. В связи с этим исследования, направленные на расширение области применения и внедрение в литейном производстве России RP-технологий являются актуальными и своевременными.

Цель работы. Исследование процессов затвердевания отливок из алюминиевых сплавов в формах, полученных на установке трехмерной печати и изготовленных по специально разработанному технологическому регламенту, с целью применения RP-технологий для изготовления литых деталей ответственного назначения.

Научная новизна.

1. Установлено, что минимальная величина толщины стенки литейных форм, изготавливаемых методом трёхмерной печати на установке Printer 310 Plus из формовочной смеси ZCast, позволяющая получать литые алюминиевые детали ответственного назначения для авиастроения, составляет 7 мм. Эта величина в 2 раза меньше значения, рекомендованного разработчиком RP-технологии для данного оборудования.

2. Определены в интервале температур 50-1000° С теплофизические свойства (теплоемкость, температуропроводность, теплопроводность) материала на основе смеси ZCast, необходимые для проведения моделирования процессов затвердевания отливок и заполнения расплавом полости формы в программе ProCAST.

3. Установлено, что структура алюминиевых сплавов в отливках, изготовленных с применением RP-технологий, аналогична структуре, полученной при литье в песчаные формы.

Практическая значимость.

1. Разработана методология конструирования отливок, литейных форм и стержней, для изготовления литых деталей ответственного назначения, в том числе для авиастроения, на базе RP-технологий.

2. Разработан технологический процесс подготовки литейных форм, напечатанных на установке Printer 310 Plus, к заливке алюминиевыми расплавами.

3. Сформирована компьютерная база данных по теплофизическим характеристикам формовочного материала на основе ZCast, используемая в программном обеспечении «ProCAST» для информационного обеспечения моделирования литейных процессов.

4. Проведено в производственных условиях инжинирингового центра «Инновационные литейные технологии и материалы» НИТУ «МИСиС» опытно-промышленное опробование технологии изготовления 7 наименований алюминиевых отливок для авиастроения на базе RP-технологий. Установлено, что технология производства отливок литьем в формы, изготовленных методом трехмерной печати, может быть использована как альтернативная литью в песчаные формы.

5. Изготовлена опытно-промышленная партия отливок из алюминиевых сплавов АК7ч и АК8л, Т5 ГОСТ 1583-93. Конструкции отливок и литниковых систем разрабатывались по результатам компьютерного моделирования процессов их затвердевания и заполнения расплавом полости форм. Геометрические параметры отливок определялись методом оптической оцифровки на установке ATOSIXL.

Апробация работы.

Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены:

- На IV Международной научно-практической конференции “Прогрессивные литейные технологии”, Москва, МИСиС 2007 г;
- на VIII Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи НТТМ, Москва, ВДНХ, ВВЦ, 2008 г.;
- На ALUSIL, Вторая Международная Конференция и Выставка «Литье алюминия» Москва, 2009 г;
- на V международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», Москва, НИТУ «МИСиС», 2009 г.г.;
- на девятом съезде литейщиков России, г. Уфа, 2009 г.
- на научных семинарах кафедры технологии литейных процессов Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (2008-2010 г.г.).

Результаты диссертационной работы отражены в 12 публикациях в виде статей и тезисов докладов конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков, 25 таблицы, состоит из введения, 7 глав, выводов, списка литературы из 107 наименований.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проанализирован новый метод литья в напечатанные формы и предложен как альтернатива для изготовления литых авиационных отливок. Обусловлены условия затвердевания отливок в формах, полученных методом трехмерной печати. Обоснована актуальность темы диссертации и сформулирована цель исследования.

В первой главе на основе обзора отечественной и зарубежной литературы рассмотрен новый подход к получению литых заготовок с рекомендуемой технологией изготовления литейных форм, получаемых методом трехмерной печати. Доказано, что при использовании новой технологии имеется возможность получать авиационное литье. Проанализирован сплав АК8л, как часто используемый при получении авиационных литых деталей, имеющий необходимый уровень механических и литейных свойств. Также проанализированы результаты работ, посвященных управлению процессом охлаждения отливки в форме. Наибольший вклад в развитие этого направления литейной технологии внесли А.И. Вейник, Б.Б. Гуляев, Г.Ф. Баландин, И.Б. Кулманин, Р.У. Раддл, Н. Хворинов и др.

По результатам изучения литературных источников были поставлены следующие задачи:

- для сокращения сроков получения литой заготовки используются такие RP-технологии, как трехмерная печать литейных форм, стоимость материала которых во много раз превышает российские аналоги. Для сокращения объема расхода дорогостоящей смеси при изготовлении литейных форм, целесообразно уменьшить толщину ее стенки, что позволит также управлять процессом охлаждения литых заготовок.

- в настоящее время авиационная отрасль промышленности требует получения литых деталей не только в кратчайшие сроки, но с высочайшим уровнем свойств. Поскольку в данной отрасли активно используется такой алюминиевый сплав, как АК8л необходимо определить его свойства при литье в напечатанные формы.

- проведенный анализ литературных источников позволил установить, что на этап кристаллизации сплава с последующим затвердеванием отливки, особую роль играет влияние материала литейной формы, поэтому при исследовании этих процессов необходимо изучение его механических, теплофизических и технологических свойств.

- известно, что каждый метод литья имеет свой класс точности полученных литых заготовок, при этом класс точности отливок, полученных литьем в напечатанные формы не известен, что в свою очередь требует его исследования.

Применение новой технологии изготовления литых авиационных заготовок позволит решить, наряду с проблемой экономичного использования формовочного материала, также и проблему сокращения сроков получения готовой продукции.

Исходя из вышеизложенного, актуальным представляется исследование процессов затвердевания отливок из алюминиевых сплавов в формах, полученных на установке трехмерной печати и изготовленных по специально разработанному технологическому регламенту, с целью применения RP-технологий для изготовления литых деталей ответственного назначения.

Во второй главе изложено описание материалов и методики исследований.

Объектом исследования являлся сплав АК8л системы Al-Si-Mg с химическим составом и свойствами, соответствующим ГОСТ 1583-93.

При печати литейных форм использовали смесь ZCast и связующий материал Zb56. Пропитывающим материалом служил раствор на основе геля кремниевой кислоты.

В качестве материалов опорных наполнителей для литейных форм использовали: 1) дробь ДЧЛ ГОСТ 11964-81; 2) кварцевый песок марки 2-3 КЗО2ОЗ ГОСТ 2138-91.

Плавку сплава проводили в печи сопротивления СШОЛ, в графито-шамотном тигле, в обычной атмосфере. Контроль температуры расплава осуществляли хромель-алюмелевой термопарой погружения.

Рафинирование расплавов проводили при помощи хлористого марганца ($MnCl_2$) при температуре $760-780^\circ C$, длительность выдержки расплава после рафинирования для полного удаления неметаллических включений составляла 8-10 минут. Модифицирование сплавов осуществляли флюсом на основе натрия состава $67\% NaCl^1 + 33\% NaF$ и лигатурой Al-Ti-B. Флюс вводили при температуре $740-760^\circ C$ на зеркало металла и после его расплавления замешивали на $1/3$ высоты столба металла. Выдержка расплава на усвоение модификатора составляла 10 минут. Лигатура Al-Ti-B вводили под зеркало расплава при температуре $720^\circ C \pm 10^\circ C$. Заливка в напечатанные формы осуществляли из окрашенного стального ковша. Температура расплава при заливке составляла $730^\circ C$.

Исследования механических, технологических и теплофизических свойств материала литейных форм проводили по стандартным методикам по ГОСТ 23409.7-78, ГОСТ 23409.10 -78, ГОСТ 23409.6-78 и ГОСТ 23250-

¹ Здесь и далее содержание компонентов в сплавах, лигатурах и т.п. приводится в массовых долях, %. Слова «массовая доля» опущены.

78соответственно. Эксперименты по определению температуропроводности и теплоемкости проводили в лаборатории коллективного пользования НИТУ «МИСиС» на приборах NETZSCHDSC 404 CPegasus и NETZSCHLFA 457 Micro-Flash[®]. Теплопроводность рассчитывали по найденной методом гидростатического взвешивания плотности материала и теплоемкости и температуропроводности материала форм.

Для исследования процесса кристаллизации сплава АК8л проводили термоанализ. Регистрацию показаний хромель-алюмелевой термопары осуществляли с помощью прибора с интерфейсом RS-485, подключенным через восьмиканальный адаптер АСЗ, в связке с компьютером. Кривые охлаждения записывали в процессе затвердевания цилиндрических проб диаметром 10мм и высотой 70мм в формах, полученных методом трехмерной печати. Для снятия температур исследуемого расплава использовали хромель-алюмелевую термопару с диаметром 0,5мм, которая помещалась в центр заливаемого образца.

Микро- и макроструктура сплава АК8л в литом и термообработанном состоянии исследовали на микроскопе «NEOPHOT-21» и электронном сканирующем микроскопе JSM–35CF. Механические свойства сплава АК8л определяли по стандартным методикам на образцах, вырезанных из отлитых проб в напечатанные и песчано-глинистые формы.

Жидкотекучесть сплава АК8л определяли по отливой в песчано-глинистую форму и форму, полученную методом трехмерной печати, спиральной пробе.

В третьей главе проведено исследование влияния толщины стенки литейной формы на распределение ее теплового поля при охлаждении алюминиевой отливки. Представлен теплофизический расчет процесса затвердевания отливки в форме при разных толщинах ее стенки. Для составления уравнения теплового баланса экспериментальным путем получены теплофизические свойства материала напечатанных форм: теплоемкость, плотность и температуропроводность.

Теплофизические свойства материала напечатанных литейных форм необходимы для расчета теплового баланса между отливкой и формой и компьютерного моделирования процессов заполнения расплавом полости литейных форм, затвердевания и охлаждения в них отливок с целью выбора наилучшего варианта технологии получения их без литейных дефектов. Однако такие сведения по материалу на основе смеси ZCast отсутствуют.

В работе определяли теплоемкость и температуропроводность материала на основе смеси ZCast в интервале температур 50-1000° С. В таблице 1 представлены результаты теплофизических свойств в интервале температур 300-800° С.

Табл. 1. Теплофизические свойства материала литейных форм

Наименование свойств	Температура, °С					
	300	400	500	600	700	800
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	1031	1027	998	1167	1183	995
Температуропроводность, $\times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	0,246	0,233	0,233	0,245	0,255	0,274
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,383	0,364	0,353	0,433	0,465	0,431

Из приведенных данных видно, что теплоемкость материала на основе смеси ZCast при температуре 700° С в 2 раза меньше значения теплоемкости материала песчано-глинистой формы указанного в литературе: 2010 Дж/(кг·К). Перепады значений теплоемкости материала на основе смеси ZCast соответствуют переходам превращений в гипсе.

Температуропроводность материала на основе смеси ZCast в зависимости от температуры имеет функциональную зависимость $y = -6 \cdot 10^{-16} x^3 + 1 \cdot 10^{-12} x^2 - 6 \cdot 10^{-10} x + 3 \cdot 10^{-7}$. При сопоставлении со значением температуропроводности материала песчано-глинистой формы ($0,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) значения температуропроводности материала на основе смеси ZCast при температуре 700° С на 38% меньше.

Теплопроводность и аккумулирующая способность исследуемого материала рассчитывали по формулам, представленным ниже:

$$\lambda_2 = a_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2, \quad (1)$$

$$b_2 = \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}, \quad (2)$$

где λ_2 – теплопроводность материала формы, Вт/(м·°С);

a_2 – температуропроводность материала формы, $\text{м}^2/\text{с}$;

c_2 – удельная теплоемкость материала формы, Дж/(кг·°С);

ρ_2 – плотность материала формы, $\text{кг}/\text{м}^3$;

b_2 – коэффициент тепловой аккумуляции тепла, $\text{Вт} \cdot \text{с}^{1/2}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Тепловой баланс между отливкой и формой проводили для оценки возможности управления процессом затвердевания отливки в литейной форме при разных толщинах ее стенки.

По полученным теплофизическим свойствам материала на основе смеси ZCast было составлено уравнение теплового баланса, которое включает следующее:

$$dQ_1 = dQ_{\text{акк}} + dQ_{\text{окр}}. \quad (3)$$

где $dQ_1 = -FX_1 \rho_1 c_1 dT_1$ - тепло, которое отливка отдает при кристаллизации;

$$dQ_{\text{акк}} = \frac{n_2}{n_2 + 1} FX_2 \rho_2 c_2 dT_2 - \text{тепло, принятое литейной формой}$$

$dQ_{\text{окр}} = \alpha F T_2 dt$ - тепло, переданное окружающей среде.

Это же количество тепла передается через поверхность соприкосновения отливки и формы:

$$dQ_1 = \lambda_2 n_2 \frac{T_1 - T_2}{X_2} F dt. \quad (4)$$

Из уравнений (3)-(4) имеется следующая система:

$$\begin{cases} X_1 \rho_1 c_1 \frac{dT_1}{dt} + \frac{\lambda_2 n_2}{X_2} (T_1 - T_2) = 0; \\ \left(X_1 \rho_1 c_1 + \frac{X_2 \rho_2 c_2}{n_2 + 1} \right) \frac{dT_1}{dt} + \frac{n_2}{n_2 + 1} X_2 \rho_2 c_2 \frac{dT_2}{dt} + \alpha T_2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

При этом тепловое поле в литейной форме, по уравнению теплового баланса описывается следующим выражением:

$$T_2 = T_{kp} D \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{m}} \right), \quad (6)$$

где $m = \frac{\frac{n_2}{n_2 + 1} X_2 \rho_2 c_2}{\frac{\lambda_2 n_2}{X_2} + \alpha}; D = \frac{\lambda_2 n_2}{\lambda_2 n_2 + \alpha X_2};$

n_2 – показатель степени параболы, описывающей температурное поле формы;

X_2 – толщина формы, м;

α – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности формы, Вт/(м²·°C).

Полученное выражение интегрируется в пределах от t_1 до t и от ζ_1 до ζ :

$$\xi = \frac{DT_{kp}}{r_1 \rho_1} \left[\alpha (t - t_1) + m \frac{\lambda_2 n_2}{X_2} \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{m}} \right) \right] + \xi_1. \quad (7)$$

При литье в напечатанные формы из материала на основе смеси ZCast с толщиной стенки равной 7, 10 и 15 мм получены их температурные поля, представленные на рисунке 1.

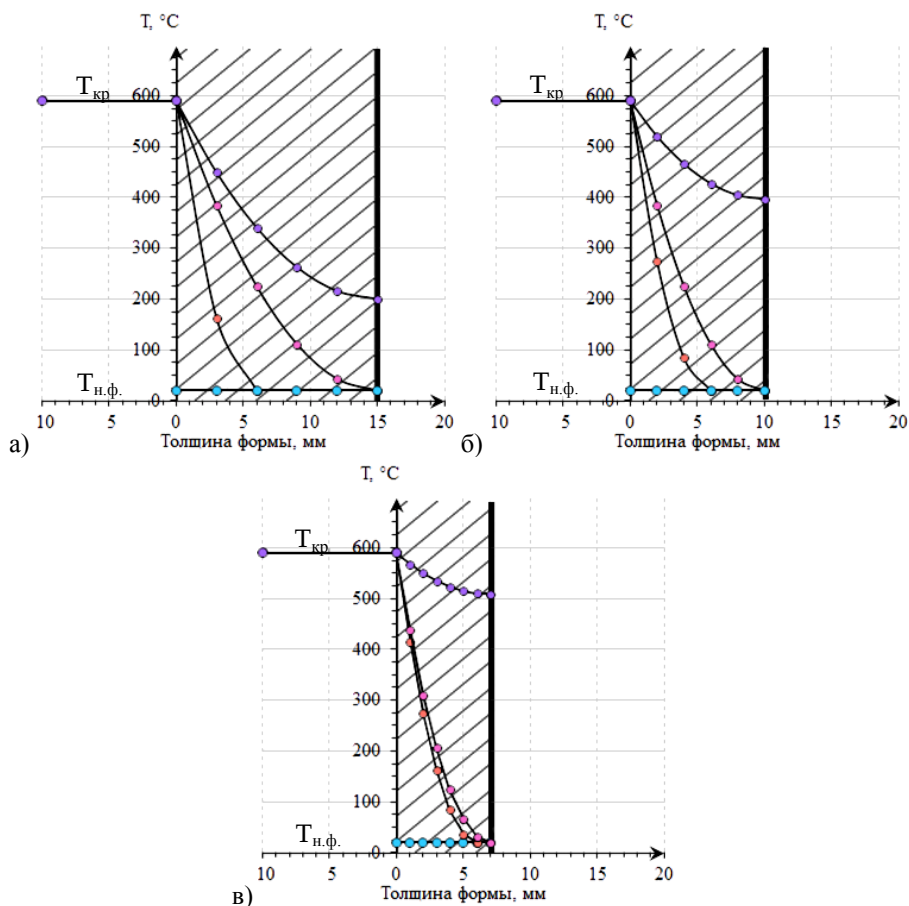


Рис. 1 – Результаты расчетов температурных полей форм с разной толщиной ее стенки: а) 15мм; б) 10мм; в) 7мм.

По результатам расчета был сделан вывод, что уменьшение толщины стенки литейной формы с 15 до 7 мм заметно сказывается на процессе за- твердевания отливки в форме. В связи с этим имеется принципиальная воз- можность уменьшить время охлаждения отливок в форме при использовании опорного металлического наполнителя.

В четвертой главе приведены результаты исследования процесса за- твердевания отливок из сплава АК8л в формах с различной толщиной ее стенки и с использованием опорного наполнителя. В главе также представле- ны результаты исследования таких свойств материала литейной формы на

основе смеси ZCast, как прочность, газопроницаемость, гигроскопичность, пористость и плотность.

1 Исследование процесса кристаллизации сплава АК8л в напечатанных формах с различной толщиной ее стенки

Для анализа процесса затвердевания отливок из сплава АК8л системы Al-Si-Mg в напечатанных формах были определены критические температуры кристаллизации сплава АК8л методом термического анализа затвердевания цилиндрической отливки в форме с толщиной стенки, рекомендуемой компанией ZCorporation и равной 15мм.

Как видно из приведенных данных, полученных из анализа кривой охлаждения сплава (Рис. 2), температура ликвидуса и солидуса хорошо соотносятся с данными политермического разреза тройной диаграммы Al-Si-Mg.

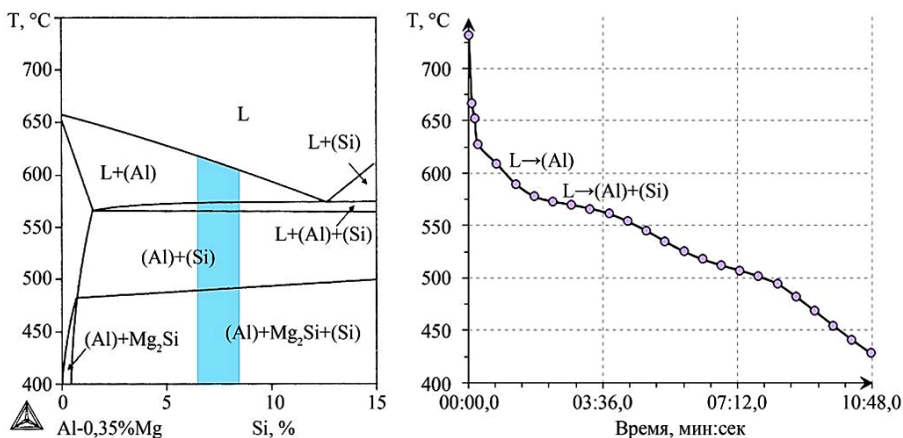


Рис. 2 – Кривая охлаждения сплава АК8л в сопоставлении с диаграммой Al-Si-Mg

Для подтверждения результатов расчета теплового баланса между отливкой и формой проведен термический анализ при заливке цилиндрических образцов из сплава АК8л в напечатанные формы с различной толщиной стенки: 7мм, 10мм и 15мм.

Полученные данные, представленные на рисунках 3-5, показывают, что охлаждение образцов из сплава АК8л в форме с толщиной 7мм происходит быстрее, чем в формах с толщинами 10 и 15мм. При этом макроструктура сплава изменяется незначительно: размер зерна увеличивается с 325 мкм до 402 мкм (Рис. 4). Размер дендритной ячейки твердого раствора α_{Al} в микроструктуре сплава изменяется с 60 мкм до 96,7 мкм (Рис. 5).

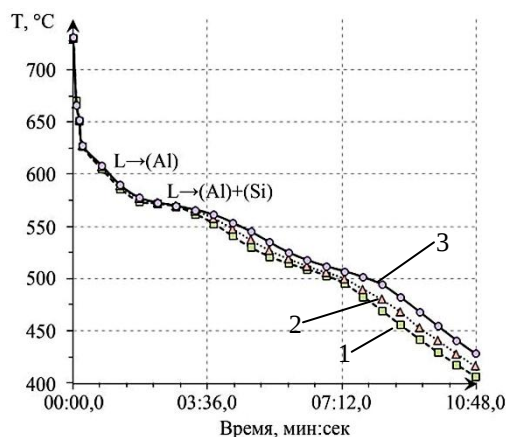


Рис. 3 – Кривые охлаждения сплава АК8л в образце «Цилиндр» с различной толщиной стенки литейной формы.
Толщина стенки формы: 1 – 7мм; 2 – 10мм; 3 – 15мм

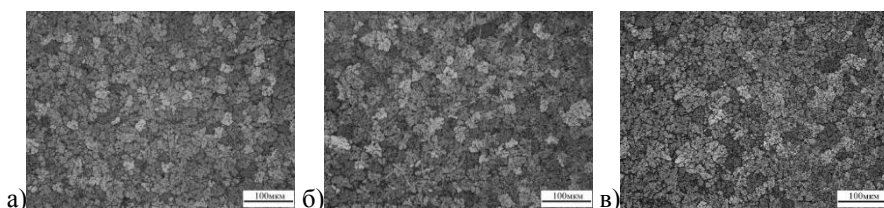


Рис. 4 – Макроструктура сплава АК8л в образце «Цилиндр» с различной толщиной стенки литейной формы: а) 7мм; б) 10мм; в) 15мм

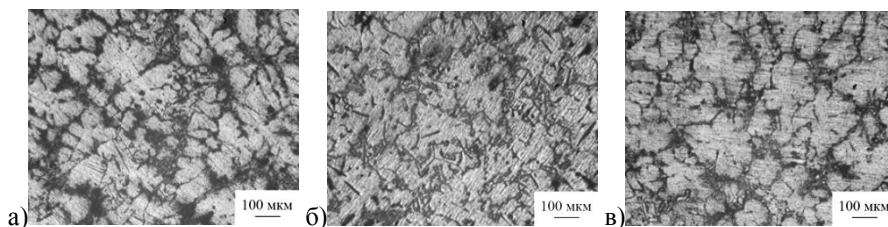


Рис. 5 – Микроструктура сплава АК8л в образце «Цилиндр» с различной толщиной стенки литейной формы: а) 7мм; б) 10мм; в) 15мм

Следовательно, можно предположить, что для придания жесткости тонкостенной (7 мм) литейной форме целесообразно применять металлический опорный наполнитель, так как он в отличие от «песчаного» будет интенсифицировать процесс охлаждения отливки в форме и, как следствие, благотворно влиять на структуру и свойства сплава АК8л. Экспериментальные данные термического анализа и структуры сплава АК8л полностью согласу-

ются теоретическим расчетом теплового баланса процесса затвердевания отливки из этого сплава в форме из материала на основе смеси ZCast.

2 Исследование свойств материала литейной формы из материала на основе смеси ZCast

В связи с тем, что толщина стенки формы заметно влияет на процесс затвердевания отливки, возникла необходимость изучения прочностных характеристик формы с целью минимизации толщины ее стенки и расхода «формовочной» смеси. Очевидно, что при уменьшении толщины стенки формы, прочность ее будет снижаться, поэтому для ее увеличения проводилась пропитка формы составом на основе геля кремниевой кислоты. Формы просушивались на воздухе с последующим их прокаливанием, проводимом в течение 60 минут при температуре 400° С. По технологии компании ZCorporation прокаливание литейных форм проводится в течение 5 часов при температуре 270° С.

Из полученных результатов (Рис. 6) прочностных свойств материала можно заключить следующее: 1) пропитанный материал формы в непрокаленном состоянии имеет более высокую прочность на разрыв чем непропитанный материал; 2) после прокаливания прочностные характеристики как у пропитанного так и непропитанного материалов снижаются, при этом прочность на разрыв пропитанного материала остается выше, чем у непропитанного; 3) наиболее заметное влияние толщины стенки на прочностные характеристики материала наблюдается в формах без прокаливания.

Не зависимо от технологии прокаливания напечатанных форм их прочность снижается вследствие интенсивного выгорания связующего материала. При этом прочность на разрыв образца толщиной 7мм из материала на основе смеси ZCast, пропитанного раствором на основе геля кремниевой кислоты, несколько превосходит прочностные свойства непропитанного образца толщиной 15мм, изготовленного по технологии компании ZCorporation. Следовательно, можно получить высокий экономический эффект на изготовление литейных форм методом трехмерной печати из материала на основе смеси ZCast, снизив расход материала более чем в 2 раза. При прокаливании по соответствующему режиму прочность падает в обоих случаях вследствие интенсивного выгорания связующего материала.

В связи с отсутствием в литературе сведений о технологических свойствах материала на основе смеси ZCast, экспериментально определены такие свойства материала, как плотность, пористость, гигроскопичность и газопроницаемость, причем как в пропитанном, так и не в пропитанном состояниях.

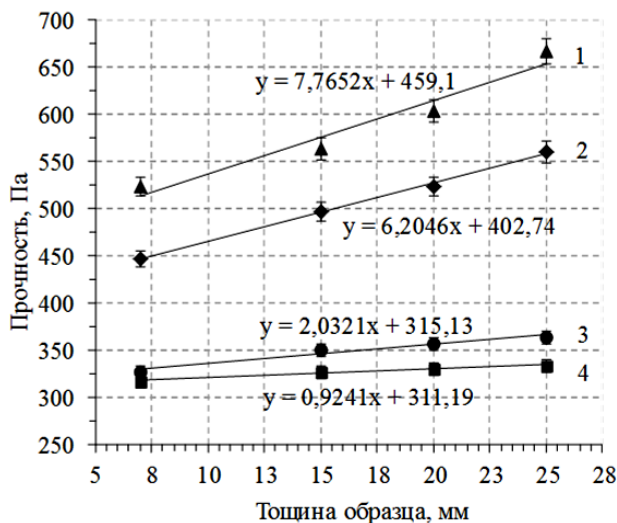


Рис. 6 – Прочность при испытании на растяжение материала в зависимости от толщины образца. Обработка материала формы:
 1) без прокаливания, пропитан; 2) без прокаливания и пропитки;
 3) прокаливание 60мин при температуре 400 °С, пропитан;
 4) прокаливание 240мин при температуре 250 °С, не пропитан

Результаты измерений плотности и пористости материала показывают, что после пропитывания формы, ее плотность возрастает (Рис. 7, а), за счет раствора на основе геля кремниевой кислоты, который обволакивает зерна наполнителя материала смеси (Рис. 8) и делает ее менее пористой (Рис. 7, б).

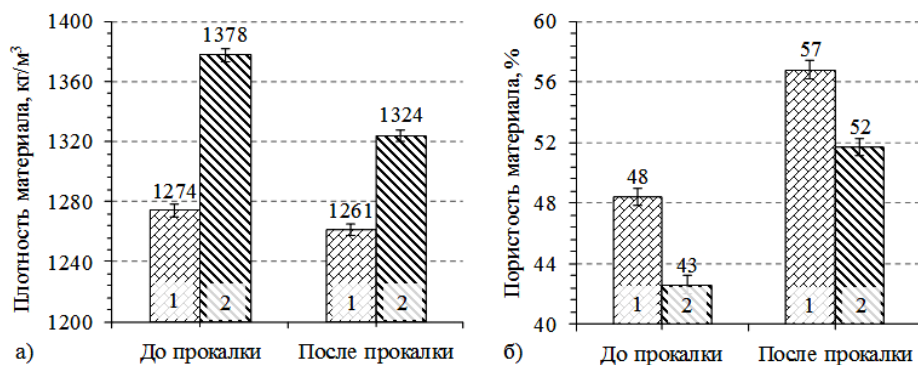


Рис. 7 – Свойства материала на основе смеси ZCast: а) плотность; б) пористость. Обработка материала: 1) не пропитан; 2) пропитан

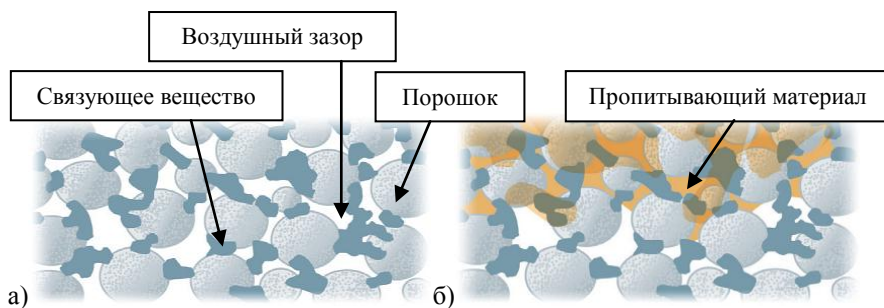


Рис. 8 – Схема пропитывания материала литейных форм:
а) до пропитывания; б) после пропитывания

При прокаливании связующее вместе с пропитанным раствором выгорают и за счет этого, понижаются значения плотности материала и как следствие повышается пористость материала.

По результатам измерения гигроскопичности материала на основе смеси ZCast (Рис. 9 а) видно, что после прокаливании она возрастает. Следовательно, при производстве отливок данным способом заливку форм следует производить сразу после прокаливании форм, во избежание набора влаги из атмосферы помещения. Результаты измерения газопроницаемости (Рис. 9 б) показывают, что у непропитанного материала без прокаливании она самая высокая. Пропитанный материал без прокаливании имеет более низкую газопроницаемость.

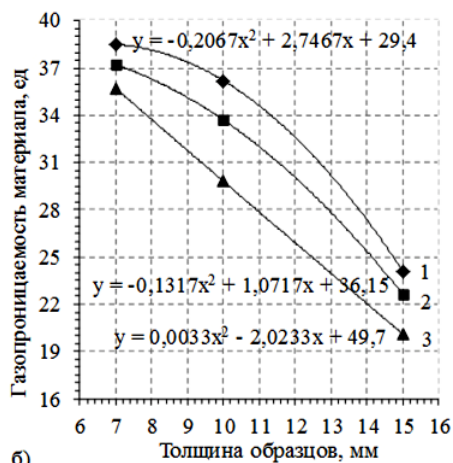
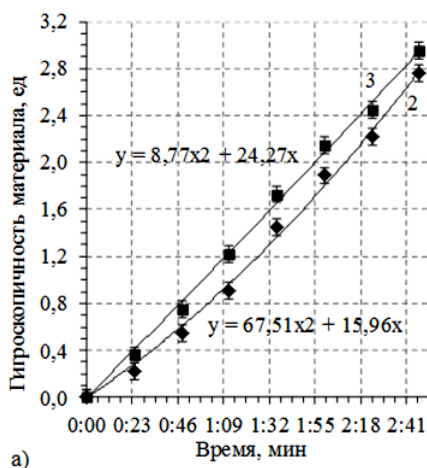


Рис. 9 – Технологические свойства материала на основе смеси ZCast:

а) гигроскопичность; б) газопроницаемость. Обработка материала:

1 – без прокаливании и пропитывания; 2 – без прокаливании, пропитан;

3 – после прокаливании и пропитывания

Кроме того, с увеличением толщины стенки формы с 7 мм до 15 мм газопроницаемость падает. Исследуя поверхность разрушения материала «формовочной» смеси было установлено, что до пропитывания и прокаливания «формовочная» смесь пористая, а после обработки материала литейных форм пропитывающим раствором на основе геля кремниевой кислоты и последующего прокаливания поры в нем закупориваются продуктом термодеструкции пропитывающего раствора. Вследствие чего происходит понижение газопроницаемости. Полученные результаты показывают, что при конструировании литейных форм, изготавливаемых методом трехмерной печати, следует учитывать необходимость наличия в них системы вентиляции для устранения газовых карманов и улучшения отвода воздуха и газов из полости формы.

На основании проведенных исследований был сделан вывод, что при конструировании литейных форм можно задавать минимальную толщину стенки формы, равную 7 мм.

3 Исследование процесса кристаллизации сплава АК8л в напечатанных формах с использованием опорного наполнителя

В связи с тем, что была установлена необходимость использования для тонкостенных литейных форм опорного наполнителя, в работе исследовано влияние на процесс кристаллизации сплава АК8л в форме двух наиболее используемых в литейных цехах материалов опорного наполнителя: кварцевый песок и чугунная дробь. Результаты термического анализа процесса кристаллизации сплава АК8л в формах с опорным наполнителем представлены на рисунке 10.

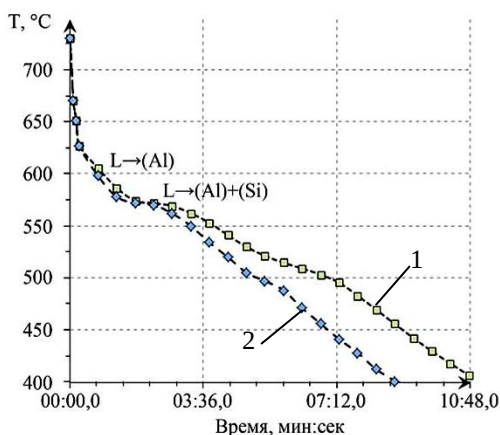


Рис. 10 – Кривые охлаждения сплава АК8л в образце при литье в напечатанные формы с разным опорным наполнителем: 1 – песок; 2 – дробь

Из полученных данных видно, что охлаждение образца в форме с опорным наполнителем – дробь диаметром 1,5-2,0 мм происходит быстрее, чем в форме с опорным наполнителем – песок. При этом в макроструктуре сплава АК8л наблюдается уменьшение размера зерна на 3%. Размер дендритной ячейки твердого раствора α_{Al} в микроструктуре сплава, соответственно, уменьшился на 16%, что хорошо согласуется с кривыми охлаждения сплава.

Скорость затвердевания отливки в форме с опорным наполнителем дробь выше за счет повышенной теплопроводности материала дробин (дробь – 1,33 Вт/(м·К), песок – 0,326 Вт/(м·К)) и его теплоаккумулирующей способности (дробь – 2790 Вт·с^{1/2}/(м²·К), песок – 620 Вт·с^{1/2}/(м²·К)) материала опорного наполнителя.

В пятой главе приведены результаты исследований литейных и механических свойств сплава АК8л при изготовлении литых заготовок методом литья в напечатанные формы из материала на основе смеси ZCast, так как сведения об этих свойствах в литературных источниках отсутствуют. Кроме того представлены данные адаптации состава исследуемого сплава к условиям получения отливок в этих формах.

Литейные свойства. Жидкотекучесть сплава АК8л изучали по спиральной пробе. В результате проведенных исследований установлено, что жидкотекучесть сплава АК8л при литье в напечатанные формы из материала на основе смеси ZCast на 6% выше, чем при литье в песчано-глинистые формы. Это вероятно связано с более низкой шероховатостью поверхности формы и с лучшей смачиваемостью расплавом материала на основе гипса (угол смачиваемости сплавом АК8л песчано-глинистой формы - 144°, формы из материала на основе смеси ZCast - 134°). При этом газовая среда в полости формы во время заливки не оказывает влияния на величину смачивания, так как $\cos\alpha < 0$. Следовательно, можно заключить, что формы, полученные методом трехмерной печати, пригодны для изготовления из сплава АК8л тонкостенных отливок сложной конфигурации.

Усадка сплава в форме из материала на основе смеси ZCast определялась путем сравнения литой заготовки и 3D моделью. Геометрия отливки оценивалась на установке ATOSII XL. Полученные результаты показали, что усадка сплава АК8л при литье в напечатанные формы такая же, как и при литье в песчано-глинистые формы и составляет 1%.

Механические свойства сплава АК8л определяли в соответствии с ГОСТ 1583-93 на отдельно отлитых образцах после термообработки по режиму T5. Результаты сопоставления механических свойств сплава АК8л при литье в формы из материала на основе смеси ZCast с различным опорным наполнителем представлены в таблице 2.

Табл. 2. Механические свойства сплава АК8л

Группа образцов (опорный наполнитель)	Предел прочности σ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение , %	Модуль упругости $E_{\text{мод}}$, ГПа
ГОСТ 1583-93	294	-	2,0	-
№ 1 (дробь)	316	309	0,3	73
№ 2 (песок)	313	305	0,3	73

Из полученных результатов (Табл. 2) видно, что предел прочности и предел текучести образцов из сплава АК8л при литье в напечатанные формы из материала на основе смеси ZCast с опорным наполнителем в виде чугунной дроби несколько выше, чем с опорным наполнителем в виде кварцевого песка и на 7,5% превышают требования ГОСТ 1583-93 для метода литья в песчано-глинистые формы. При этом относительное удлинение сплава АК8л в образцах составило 0,3 %. Анализ микроструктуры сплава показал, что низкая пластичность обусловлена наличием в ней интерметаллидных фаз игольчатой формы (Рис. 11).

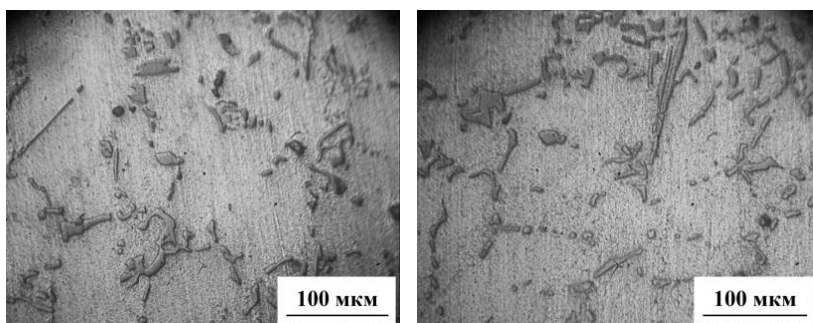


Рис. 11 – Микроструктура сплава АК8л после ТО по режиму Т5

В соответствии с атласом микроструктур этими фазами могут быть включения, содержащие железо и титан. Исходя из литературных данных, образование этих фаз в данном диапазоне содержания легирующих и примесных элементов в составе сплава имеет большую вероятность. Так, например, при $Ti > 0,2\%$ образуется первичная фаза $TiSi_2$ игольчатой формы. Следовательно, для стабильного получения отливок ответственного назначения из сплава АК8л методом литья в напечатанные формы необходимо оптимизировать его состав, в части содержания в нем элементов, оказывающих отрицательное влияние на пластичность.

Адаптация состава сплава АК8л для получения отливок в формах, напечатанных из материала на основе смеси ZCast.

Адаптацию сплава АК8л для получения отливок в формах, напечатанных из материала на основе смеси ZCast проводили, исходя из условий медленной кристаллизации, при которой в структуре образуются грубые фазы, требующие модифицирования расплава и из необходимости получения плотных отливок сложной конфигурации. Из литературы известно, что Ве и Мп, содержащиеся в сплаве, видоизменяют форму железистой фазы, а Ti измельчает макрозерно в структуре сплава в отливке. Избыточное содержание Mg в сплаве вызывает снижение его пластичности. В связи с этим верхний предел должен обеспечивать невысокую объемную долю образуемых магнием эвтектических фаз, в частности Mg_2Si и Θ .

Известно, что плотность отливок во многом зависит от интервала кристаллизации сплава. Анализ политермических разрезов диаграмм состояния системы Al-Si-Mg показал, что кремний в 2 раза эффективнее влияет на интервал кристаллизации сплава, чем магний (Si уменьшает интервал кристаллизации на $12^\circ C$, Mg увеличивает интервал на $6^\circ C$). При этом увеличение кремния в сплаве с 6,5% до 8,5% при постоянном содержании магния снижает температуру ликвидус на $13^\circ C$ и температуру солидус на $1^\circ C$, а увеличение магния с 0,35% до 0,55% при постоянном содержании кремния снижает температуру ликвидус на $1^\circ C$ и температуру солидус на $7^\circ C$.

Исходя из анализа литературных данных о влиянии легирующих элементов на структуру силуминов системы Al-Si-Mg и политермических разрезов диаграммы состояния этой системы, установлено, что для получения отливок ответственного назначения в формах, полученных методом трехмерной печати, целесообразно применять сплав АК8л с пониженным содержанием в нем кремния (не более 7,5%), магния (не более 0,45%), титана (не более 0,2%), бериллия (не более 0,2%) и железа (не более 0,3%). При этом в структуре сплава отсутствуют иглообразные включения, а уровень механических свойств отвечает требованиям ГОСТ 1583-93 (Рис. 12, табл. 3).

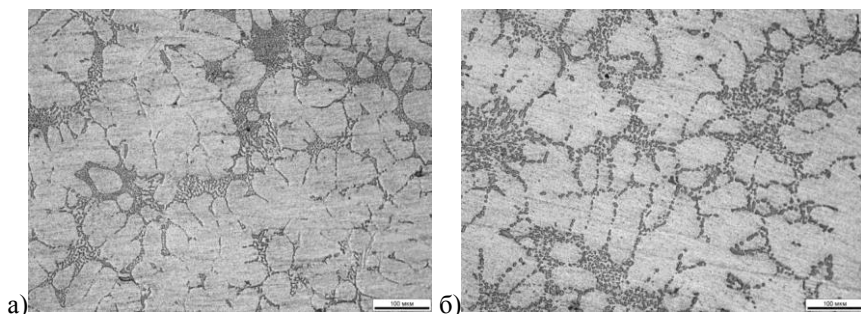


Рис. 12 – Микроструктура сплава АК8л: а) в литом состоянии; б) после термообработки по режиму T5 согласно ГОСТ 1583-93

Табл. 3. Механические свойства отливок ответственного назначения

Испытания	Предел прочности σ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение, %	Модуль Юнга $E_{\text{мод}}$, ГПа
ГОСТ 1583-93	294	-	2,0	-
Средние показатели	333	288	2,3	76
Примечание: образцы для определения механических свойств, полученные литьем в формы, напечатанные из материала на основе смеси ZCast				

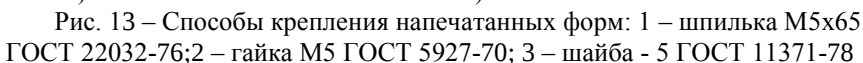
В шестой главе приведены рекомендации по конструированию литейных форм для последующей их трехмерной печати из материала на основе смеси ZCast и результаты определения класса точности полученных отливок.

Особенности конструирования литейных форм, изготавливаемых методом трехмерной печати. При получении литых деталей ответственного назначения с использованием предложенного режима подготовки литейных форм к заливке металлом (пропитывание раствором на основе геля кремниевой кислоты и прокаливание при температуре 400° С в течение 1 ч.) в конструкциях форм необходимо обязательно предусматривать систему вентиляции для отвода газов из полости формы. Для этой цели используются вентиляционные каналы с размером (диаметр) ≥ 3 мм и по плоскости разъема щели максимальной толщиной $\leq 0,5$ мм.

Оболочковый метод построения напечатанных на установке трехмерной печати форм, разработанный НИТУ «МИСиС», требует учитывать следующее:

- плоскость разъема литейной формы располагать таким образом, чтобы при последующей ее обдувке сжатым воздухом для очистки от лишнего материала был доступ ко всем поверхностям, которые выполняют конфигурацию будущей отливки;
- для элементов крепления в плоскости разъема необходимо предусматривать площадку размером не менее 30 мм;
- не рекомендуется располагать плоскости разъем вдоль течения расплава, так как при заливке формы это может привести к прорыву расплава в месте разъема;
- не рекомендуется располагать плоскость разъема так, чтобы на одной из частей формы получались тонкие стенки, что может привести к их поломке при обдувке или сборке формы.

Сборка и центрирование элементов формы осуществляются с помощью крепежных болтов и штифтов. При использовании оболочковой формы, полученной методом трехмерной печати, толщиной 7 мм, рекомендуется использовать способы крепления, представленные на рисунке 13. Данный способ одновременно выполняет функцию крепления и центрирование элементов формы при ее сборке.



В формах, полученных методом трехмерной печати по оболочковому принципу, необходимо предусматривать ребра жесткости толщиной 0,8-1,0 от толщины стенки формы.

Определение класса точности отливки. Определение класса точности алюминиевых отливок, получаемых литьем в формы, напечатанные из материала на основе смеси ZCast, осуществлялось с помощью установки оптической оцифровки материальных объектов модели ATOSII XL. Оцифровка производилась в лаборатории, аккредитованной на техническую компетентность и независимость ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025:2006. В результате обмера установлено, что точность отливок с максимальным габаритным размером 100-250 мм соответствует 6 классу размерной точности ГОСТ 26645-85.

При опытно-промышленном опробовании отливки изготавливали из сплава АК8л, химический состав которого приведен в таблице 4. Литейные формы получали методом трехмерной печати из материала на основе смеси ZCast по инструкции НИТУ «МИСиС». Толщина стенок формы составляла 7

мм. В качестве опорного наполнителя использовали чугунную дробь ДЧЛ ГОСТ 11964-81.

Табл. 4 – Химический состав сплава АК8л

АК8л	Легирующие элементы, %				Примеси, % не более			
	Si	Mg	Be	Ti	Fe	Mn	Cu	Zn
	6,5-7,5	0,35-0,45	0,15-0,2	0,15-0,20	До 0,3	До 0,1	До 0,3	До 0,3

Опытно-промышленное опробование проведено в производственных условиях инжинирингового центра «Инновационные литейные технологии и материалы» «МИСиС». Были изготовлены опытные партии 7 наименований алюминиевых отливок в количестве 24 штук. В соответствии с требованиями конструкторской документации отливки проходили 100% рентген контроль (Рис. 14) и каждая плавка сплава контролировалась на химический состав и механические свойства ГОСТ 1583-93.

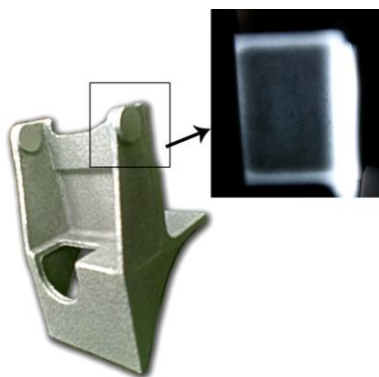


Рис. 14 – Литая заготовка с результатом рентген контроля

Дополнительно проводился микроструктурный анализ структуры сплава АК8л при изготовлении отливок методом литья в напечатанные формы из материала на основе смеси ZCast (Рис. 15).

Из анализа микроструктуры видно, что в результате модифицирующего влияния бериллия железо выделяется в виде интерметаллида типа Al_8Fe_2BeSi скелетообразной формы. Данное соединение позволяет уменьшить вредное влияние примеси железа на механические свойства сплава АК8л в литых заготовках.

По морфологии структура сплава АК8л в литом и термообработанном состояниях при литье в напечатанные формы из материала на основе смеси ZCast схожа со структурой при литье в песчано-глинистые формы.

На основании проведенного опытно-промышленного опробования установлено, что метод литья в напечатанные формы из материала на основе сме-

си ZCast позволяет изготавливать отливки ответственного назначения из алюминиевых сплавов в полном соответствии требованиям ГОСТ 1583-93 и конструкторской документации на литые авиационные детали (ОСТ 1.4154-72).

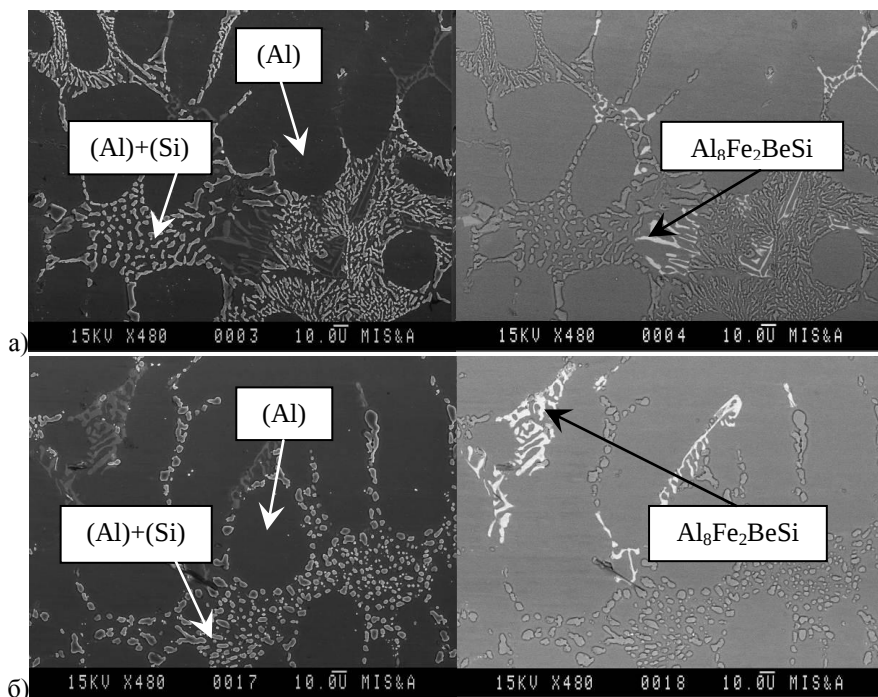


Рис. 15 – Микроструктура сплава АК8л; СЭМ: а) в литом состоянии (во вторичных и отражательных электронах); б) после термообработки по режиму Т5 (во вторичных и отражательных электронах)

На основании проведенного опытно-промышленного опробования установлено, что метод литья в напечатанные формы из материала на основе смеси ZCast позволяет изготавливать отливки ответственного назначения из алюминиевых сплавов при серийном производстве с механическими свойствами, соответствующим требованиям ГОСТ 1583-93.

3. ВЫВОДЫ

1. Определены теплофизические свойства материала напечатанной литейной формы, которые позволили рассчитать аналитическим методом тепловое поле в отливке и форме. Результаты исследований теплофизических свойств материала на основе смеси ZCast можно включить в базу данных

программ ProCast и Polygon и использовать для моделирования процессов заполнения расплавом формы и затвердевания отливок.

2. Расчет теплового баланса и экспериментальные исследования подтвердили возможность управления процессом затвердевания отливки при уменьшении толщины стенки литейной формы и использовании опорного наполнителя. В частности, изменение толщины стенки формы с 15 мм на 7 мм привело к измельчению размера зерна с 402 мкм до 325 мкм. При этом предел прочности при растяжении образца с использованием песка составил 313 МПа, дроби – 316 МПа.

3. Для форм, изготавливаемых методом трехмерной печати, из материала на основе смеси ZCast определена минимальная толщина стенки – 7 мм. Предложен способ обработки материала формы раствором на основе геля кремниевой кислоты, позволяющий получать в образцах с толщиной стенки 7 мм прочность на разрыв 326 Па, которая соответствует материалу, обработанному по рекомендациям компании ZCorp. в образцах с толщиной стенки 15 мм.

4. Определены литейные и механические свойства сплава АК8л при изготовлении отливок методом литья в напечатанные формы с толщиной стенки, равной 7мм. Жидкотекучесть сплава АК8л составила 847 мм по спиральной пробе. Значение механических свойств превосходят требования ГОСТ 1583-93: предел прочности при растяжении образца 333 МПа, предел текучести – 288 МПа, относительное удлинение – 2,3%, модуль упругости – 76 ГПа.

5. Адаптирован химический состав сплава АК8л для литья в напечатанные формы из материала на основе смеси ZCast. Рекомендованы допустимые концентрации вводимых в расплав легирующих элементов.

6. Разработана технология конструирования литейных напечатанных форм, которая включает в себя: выбор плоскости разреза, способ крепления элементов литейной формы и упрочнения ее конструкции в целом, систему вентиляции. Применение этой технологии обеспечивает получение качественных литых деталей и снижение затрат на их производство.

7. Определен класс размерной точности отливок, получаемых литьем в напечатанные формы – 6 класс размерной точности по ГОСТ 26645-85.

8. Разработана и опробована технология получения отливок ответственного назначения из сплава АК8л литьем в напечатанные формы с толщиной стенки 7 мм из материала на основе смеси ZCast. Опытная партия 7 наименований отливок в количестве 24 шт. признана годной и передана заказчику ОАО «Ил».

Основные результаты работы представлены в публикациях:

1. Дрокина В.В., Белов В.Д. и Золоторевский В.С. Некоторые аспекты изготовления отливок из алюминиевых сплавов методом быстрого прототипирования // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 2009, № 5. – С. 48-52;

2. Drokina V.V., Belov V.D. and Zolotorevskii V.S. Manufacture of Aluminum-Alloy Castings by Fast Prototyping // *Steel in Translation*. – 2009, Vol. 39, № 5. – pp. 394–398;

3. Белов В.Д., Белов Н.А., Дрокина В.В. Новые материалы и ускоренная подготовка производства – гарантированный успех на рынке производства литейной продукции // *ALUSIL, Вторая Международная Конференция и Выставка «Литье алюминия»* Москва, Россия 1-3 апреля 2009. – Компакт-диск;

4. Белов В. Д., Белов Н. А., Дрокина В. В. Новые материалы и ускоренная подготовка производства - гарантия успеха на рынке литейной продукции // *Литейное производство*. – 2009, № 5. – С. 13-16.

5. Дрокина В.В., Белов В.Д. Некоторые аспекты изготовления отливок методом быстрого прототипирования // *Труды девятого съезда литейщиков России*. Уфа: 2009. – С. 298-299;

6. Дрокина В.В., Белов В.Д. Класс точности и степень точности поверхности литых заготовок, полученных в формах, выращенных методом трехмерной печати // *Литейщик России*. – 2009, № 7. – С. 16-18;

7. Е.Л. Журавлева, В.Д. Белов, В.В. Дрокина. Оптимизация сплава АМ5 для изготовления отливок в формах, полученных методом быстрого прототипирования // *Прогрессивные литейные технологии. Труды 5-й международной научно-практической конференции* М.: МИСиС. – 2009. – С.70-71;

8. Чехонин С.Н., В.В. Дрокина, В.Д. Белов. Исследование прочностных и теплофизических свойств смеси ZCast // *Прогрессивные литейные технологии. Труды 5-й международной научно-практической конференции* М.: МИСиС. – 2009. – С. 203-205;

9. В.В. Дрокина, В.Д. Белов. Получение отливок высокого качества методом быстрого прототипирования моделей и форм // *Прогрессивные литейные технологии. Труды 5-й международной научно-практической конференции* М.: МИСиС. 2009. – С. 206-207;

10. В.В. Дрокина, В.Д. Белов. Особенности конструирования литейных форм, полученных методом трехмерной печати, при производстве алюминиевых отливок // *Научно-технические ведомости СПбГТУ*, - 2010, № 3 (106). – С. 149-152;

11. В.В. Дрокина, В.Д. Белов, С.Н. Чехонин. Получение отливок из алюминиевых сплавов литьём в разовые формы, изготовленные на установках 3-х мерной печати // *Изв. ВУЗов. Цветная металлургия*. – 2011, № 1. С. 27-31;

12. Drokina V.V., Belov V.D., Chekhonin S.N. Obtaining casts of aluminum alloys by foundry in loose molds fabricated on installations of three-dimensional printing // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2011, Vol. 52, № 1. – pp. 24-28.

