

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное образовательное бюджетное  
учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный  
технический университет»

На правах рукописи

Лукьянов Александр Александрович

**Исследование процесса центробежного литья алюминиевого сплава**

Направление 15.04.01 – «Машиностроение»

Профиль подготовки – «Машины и технология литейного производства»

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание академической степени магистра

*Лукьянов*

2016

Коротченко  
Лариса Никитовна  
**Проверено**  
24.08.2016 Центр Библиотек

Работа выполнена на кафедре «Машиностроение и металлургия»  
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Научный руководитель: Черномас. Вадим. Владимирович.  
Докт. технических наук, профессор

Рецензент: Физулаков Роман Анатольевич  
кандидат технических наук, доцент,  
Начальник научно – производственной лаборатории  
конструкционных материалов, научно производственного отдела  
ПАО «Компания «Сухой» «Комсомольский-на-Амуре  
Авиационный завод имени Ю.А. Гагарина » г. Комсомольск-на-  
Амуре

Защита состоится «24» июня 2016г. в 9 часов на заседании  
государственной аттестационной комиссии в Комсомольском-на-Амуре  
государственном техническом университете по адресу: 681013, г.  
Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, КнАГТУ, ауд. 221-2.

С диссертацией можно ознакомиться на кафедре «Машиностроение и  
металлургия» КнАГТУ.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Повышение требований к продукции машиностроения вызывает необходимость решения проблемы повышения качества заготовок и устойчивости технологических процессов их производства. Основной технологической особенностью центробежного литья является, то что заполнение литейной формы (изложницы) расплавом, затвердевание и охлаждение отливки в форме происходит под действием центробежных сил, возникающих при вращении литейной формы относительно своей вертикальной или горизонтальной оси. При этом определяющее влияние на структуру и качество получаемых отливок оказывают факторы, определяющие температурный режим в системе «металл–форма» и кинематические характеристики оборудования, определяющие величину силового воздействия в процессе затвердевания отливки. При всех своих преимуществах (высокая гидроплотность, связанная с минимальной газовой и усадочной пористостью в отливках, простота и низкая стоимость литейной оснастки и др.), отраженных в работах Л.С.Константинова, С.Б.Юдина, Ю.А.Степанова, Г.С. Мирзояна, Д.В.Занько, Е.К.Иванько, J.W.Gao, W.Zhang, W.Huisman, К.Н.Kim, E.Jayakumar, С.П.Серебрякова, В.Ю.Стеценко и др., данный технологический процесс обладает низкой устойчивостью при литье алюминиевых сплавов, склонных к ликвации. Повышение устойчивости технологического процесса изготовления отливок за счет управления технологическими параметрами процесса на основе их взаимосвязи позволит прогнозировать и управлять качеством отливок еще на стадиях проектирования технологического процесса их производства. Для центробежного литья к числу основных технологических параметров, оказывающих влияние на процессы кристаллизации, и как следствие, на качество отливок относятся факторы, определяющие температурные режимы и силовые характеристики процесса. Теоретическое описание

процессов, протекающих в системе «кристаллизирующийся металл–литейная форма» в условиях действия поля центробежных сил связано с рядом затруднений, возникающих при решении связанной температурной (с учетом фазового перехода) и деформационной задачи, а также с верификацией результатов моделирования.

Таким образом, актуальным направлением исследования является повышение качества отливок за счет управления технологическими параметрами процесса их формирования.

**Целью работы** является определение рациональных режимов получения отливок из алюминиевого сплава АК7ч на установках центробежного литья на основе учета взаимного влияния основных параметров процесса на качество получаемых отливок.

**Научная новизна** обуславливается следующими положениями:

– установлены закономерности изменения макро– и микроструктурных параметров отливок в зависимости от температур заливаемого расплава, предварительного нагрева формы (изложницы) и скорости ее вращения;

– установлены закономерности изменения физико-механических свойств отливок в зависимости от температур заливаемого расплава, предварительного нагрева формы (изложницы) и скорости ее вращения;

– построены линейные модели, описывающие зависимость макро– и микроструктурных параметров, а также физико–механических свойств отливок от основных параметров процесса в технологически обоснованных интервалах их изменения.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов и выводов основывается на использовании поверенного комплекса контрольно–измерительного оборудования для проведения экспериментальных исследований, использованием нормированных методик определения физико–механических свойств и макро– и

микроструктурных параметров, а также соответствием полученных результатов экспериментальных данных фундаментальным положениям механики деформируемого твердого тела и теплофизики.

**Практическая значимость.** Результаты, полученные в работе, позволили:

– разработать конструкцию экспериментального стенда центробежного литья с вертикальной осью вращения, в состав которого включены устройства, позволяющие контролировать основные параметры процесса и внедрить его в учебный процесс на кафедре машиностроения и металлургии для проведения лабораторных работ по дисциплинам «Оборудование литейных цехов», «Специальные виды литья» и «Основы технологии литейного производства»;

– разработать технологические рекомендации для получения отливок со свободной поверхностью типа «втулка» из алюминиевого сплава АК7ч;

– получить данные и провести анализ структуры алюминиевого сплава АК7ч, кристаллизующегося в условиях действия поля центробежных сил и различного теплоотвода со стороны формообразующих поверхностей оснастки.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научной студенческой конференции «Студенческая весна» (Комсомольск-на-Амуре, 2016 г.) и региональном научно-практическом семинаре «Инженерно-технологическое образование как средство социализации современной молодежи» (Комсомольск-на-Амуре, 2016 г.).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы (27 наименований) и 2 приложений. Общий объем работы – 68 страниц, в том числе 47 рисунков и 8 таблиц, включенных в текст.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 2 печатных работы

**Личный вклад автора.** Автор провел экспериментальные исследования; разработал методики и устройства для проведения экспериментальных исследований, обработал полученные результаты, а также сформулировал выводы.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

– конструкция экспериментального стенда центробежного литья с вертикальной осью вращения, в состав которого включены устройства, позволяющие контролировать основные параметры процесса;

– закономерности изменения макро– и микроструктурных параметров отливок в зависимости от температур заливаемого расплава, предварительного нагрева формы (изложницы) и скорости ее вращения;

– закономерности изменения физико-механических свойств отливок в зависимости от температур заливаемого расплава, предварительного нагрева формы (изложницы) и скорости ее вращения;

– линейные модели, описывающие зависимость макро– и микроструктурных параметров, а также физико–механических свойств отливок от основных параметров процесса в технологически обоснованных интервалах их изменения;

– технологические рекомендации для получения отливок со свободной поверхностью типа «втулка» из алюминиевого сплава АК7ч;

– анализ структуры алюминиевого сплава АК7ч, кристаллизующегося в условиях действия поля центробежных сил и различного теплоотвода со стороны формообразующих поверхностей оснастки.

**Содержание работы**

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, представлены исходные данные для разработки темы исследования, а также обоснована необходимость проведения работ.

В первой главе работы проанализированы основные технологические и конструктивные схемы центробежного литья, определены его область применения, основные технологические параметры, преимущества и недостатки.

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

– центробежное литье позволяет получать отливки обладающие минимальными газовыми и усадочными дефектами, что позволяет использовать данную технологию для изготовления заготовок ответственных деталей с высокими показателями гидроплотности;

– основными независимыми факторами, определяющими качество получаемых центробежных отливок, являются: скорость (частота) вращения литейной формы (изложницы), скорость заливки металла в форму, а также тепловые режимы формирования отливки. При этом тепловые режимы формирования отливки определяются начальной температурой формы перед заливкой, температурой заливаемого металла и скоростью охлаждения формы после ее заливки металлом;

– расчет основных технологических параметров процесса основан на использовании эмпирических зависимостей на базе гравитационного коэффициента, что дает достаточно большую погрешность при расчете параметров процесса при литье цветных сплавов с невысокой плотностью;

– теоретические модели процесса центробежного литья достаточно формализованы и включают в себя большое количество допущений, связанных с процессами, протекающими в системе «форма – затвердевающий металл».

На основе проведенного анализа литературных источников была сформулирована цель и определены задачи, решаемые в диссертации,

представлены научная новизна и практическая значимость, обоснованность и достоверность полученных результатов, личный вклад. а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**Вторая глава** диссертации посвящена выбору и разработке методик проведения исследований, определены объекты и разработан план проведения экспериментальных исследований, представлены методики определения физико-механических свойств, химического состава сплава и макро– и микроструктурных параметров отливок.

В качестве объекта исследования были выбраны цилиндрические отливки со свободной поверхностью типа «втулка» (рис. 2.1), изготовленные на центробежной машине с вертикальной осью вращения из алюминиевого сплава АК7ч (ГОСТ 1583–93) с наружным и внутренним диаметром соответственно 85 и 60 мм, и высотой 80 мм. В качестве независимых факторов были выбраны: температура литейной формы (изложницы) перед заливкой ( $X_1$ ); температура заливки расплава в изложницу ( $X_2$ ); частота вращения изложницы ( $X_2$ ). Остальные факторы процесса фиксировали на постоянном уровне и принимали равными константам. В связи с незначительным количеством независимых факторов использовали двухуровневый полный факторный эксперимент типа  $2^X$ . В качестве откликов полного факторного эксперимента были выбраны, показатели, характеризующие гидроплотность и структуру, получаемых отливок: предел прочности при растяжении ( $Y_1$ ); ударная вязкость ( $Y_2$ ); условная плотность структуры ( $Y_3$ ); микротвердость ( $Y_4$ ).

Испытание образцов на растяжение производили согласно ГОСТу 1497-84 на испытательной машине INSTRON 3382.

Испытание образцов на ударную вязкость производили согласно ГОСТ 9454-78 на испытательном маятниковом копре модели JB-W300.

Исследование структуры материала проводилось на металлографическом микроскопе Nikon MA200. Темплеты получали из



отливок и наносили на них соответствующую маркировку: В –верх, Н – низ, С – середина (рисунок 1).

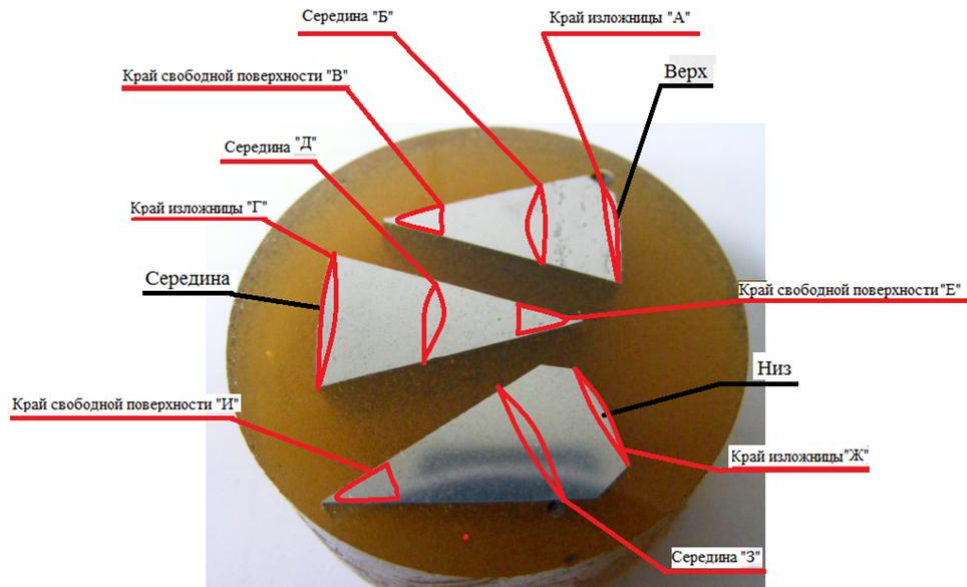


Рисунок 1 – Маркировка темплетов

Обработка снимков микроструктуры образцов производится в программе Image-PRO Plus версии 5.1. Используя данную программу определяли условную плотность структуры из анализа ее снимков на анализируемой площади образца. С помощью программы определяются и выводятся на монитор компьютера статистические результаты обработки изображений в виде гистограммы распределения данных (рисунок 2).

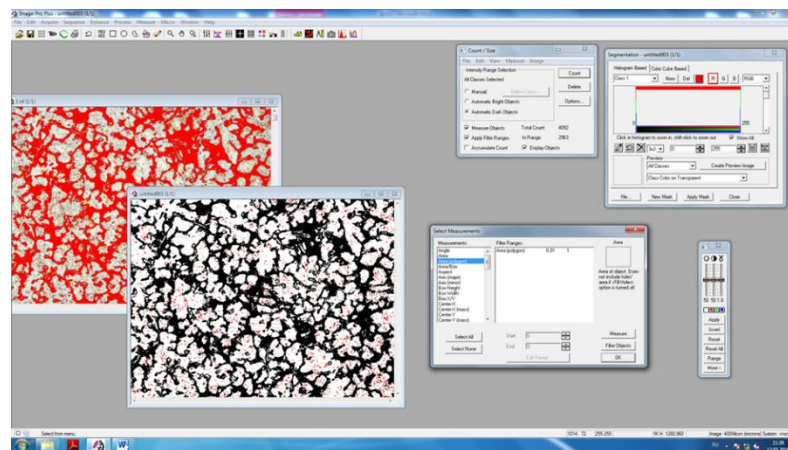
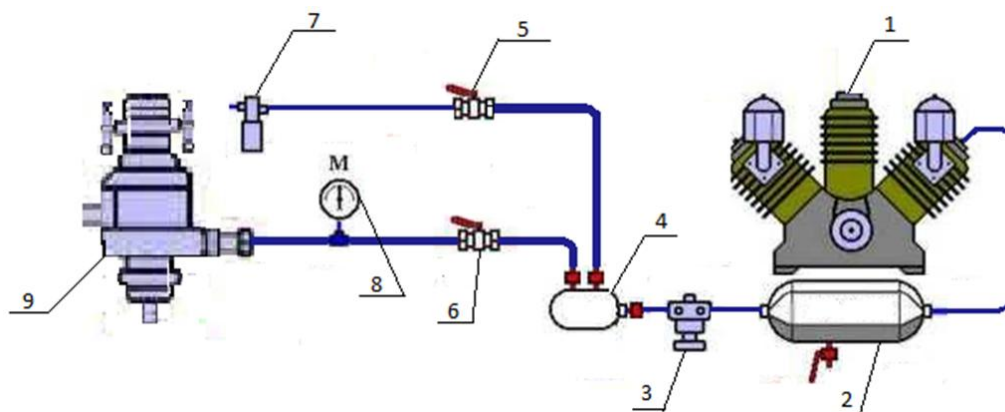


Рисунок 2 – Скриншот окна программы Image-PRO Plus

В третьей главе диссертации представлены описание конструкции экспериментального стенда, разработаны пневматическая схема привода, система охлаждения и торможения изложницы, описаны элементы системы мониторинга основных технологических параметров процесса.

На рисунке 3 представлена принципиальная пневматическая схема экспериментального стенда.



- 1 – компрессор; 2 – ресивер; 3 – редуктор давления; 4 – коллектор;  
5 – кран системы охлаждения; 6 – кран пневмопривода;  
7 – система охлаждения; 8 – манометр; 9 – пневмодвигатель.

Рисунок 3 – Пневматическая схема экспериментального стенда

В качестве привода экспериментального стенда был выбран роторный пневмодвигатель (пневмотурбина). Регулирование частоты вращения ротора пневмодвигателя осуществляется с помощью вентиля, регулирующего объемный расход сжатого воздуха подводимого к крыльчатке ротора пневмодвигателя. Для охлаждения литейной формы (изложницы) использовали воздушно-капельный способ (охлаждение водной дисперсией). Для реализации данного способа охлаждения было сконструировано и изготовлено устройство, работа которого была интегрирована в систему привода пневмодвигателя. Система торможения литейной формы (изложницы) рычажно-фрикционная с ручным приводом. Система мониторинга технологических параметров процесса включает в себя устройства и датчики контроля температуры и частоты вращения

изложницы. Частота вращения определяется при помощи электронного бесконтактного тахометра модели UNIT UT372 оборудованного встроенным лазерным маркером и USB-портом для передачи данных на компьютер. Температура изложницы контролируется с помощью ХА-термопар с диаметром проволоки от 0,2 до 0,5 мм.

Четвертая глава диссертации посвящена анализу результатов исследования и построению линейных моделей формирования свойств отливок, влияние основных технологических параметров процесса на формирование физико-механических свойства, макро– и микроструктуры отливок, проведен анализ результатов исследования и разработаны технологические рекомендации изготовления отливок типа «втулка» из сплава АК7ч.

Используя полученные в работе экспериментальные данные с применением прикладной программы STATAN были построены линейные модели формирования физико–механических свойств отливок и структурных параметров с учетом совместного влияния основных параметров процесса. Обработку полученных результатов проводили методом наименьших квадратов. Оценку адекватности полученных моделей производили по критерию Фишера (F– критерий), а статистическую значимость коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента (t– критерий).

$$\sigma_B = -833 + 3,9T_{\Phi} + 1,43T_M + 0,27n - 5,2 \times 10^{-3} T_{\Phi} \times T_M - 1,6 \times 10^{-4} T_{\Phi} \times n - 3,1 \times 10^{-4} T_M \times n; \quad (1)$$

$$\psi = 5,8 - 5,05 \times 10^{-3} T_M - 3,96 \times 10^{-3} n - 4,53 \times 10^{-6} T_{\Phi} \times T_M + 2,01 \times 10^{-6} T_{\Phi} \times n + 5,64 \times 10^{-6} T_M \times n; \quad (2)$$

$$\rho_y = -1,24 + 2,98 \times 10^{-3} T_{\Phi} + 1,8 \times 10^{-3} T_M + 4,87 \times 10^{-3} n - 3,81 \times 10^{-4} T_{\Phi} \times T_M - 2,43 \times 10^{-7} T_{\Phi} \times n - 6,3 \times 10^{-7} T_M \times n; \quad (3)$$

$$\mu_{HV} = -148 + 0,16T_{\Phi} + 0,38T_{M} + 0,15n - 9,35 \times 10^{-5} T_{\Phi} \times T_{M} - 3,32 \times 10^{-5} T_{\Phi} \times n - 2,35 \times 10^{-4} T_{M} \times n, \quad (4)$$

где  $T_{\Phi}$  – начальная температура формы (изложницы),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{M}$  – температура заливаемого расплава,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$n$  – частота вращения формы (изложницы), об/мин;

$\sigma_B$  – предел прочности на растяжение, МПа;

$\psi$  – ударная вязкость, Дж/см<sup>2</sup>;

$\rho_y$  – условная плотность структуры, 1/мкм<sup>2</sup>;

$\mu_{HV}$  – микротвердость, HV.

Из анализа поверхностей откликов (рисунок 4) линейных моделей (1–4) установлены рациональные режимы изготовления центробежных отливок из сплава АК7ч, на основе которых были сформулированы технологические рекомендации, а именно  $n=2000\text{--}2300$  об/мин,  $T_{\Phi}=220\text{--}250$   $^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{M}=670\text{--}720$   $^{\circ}\text{C}$ .

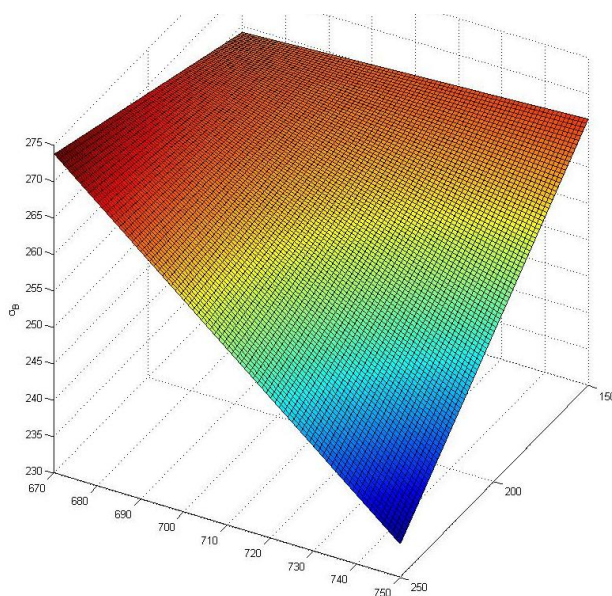


Рисунок 4 – Поверхность отклика  $\sigma_B$  при  $n=2000$  об/мин

### Основные результаты работы

1. Установлены закономерности изменения макро- и микроструктурных параметров и физико-механических свойств отливок в

зависимости от температур заливаемого расплава, предварительного нагрева формы (изложницы) и скорости ее вращения.

2. Построены линейные модели, описывающие зависимость макро– и микроструктурных параметров, а также физико–механических свойств отливок от основных параметров процесса в технологически обоснованных интервалах их изменения.

3. Проведен анализ структуры алюминиевого сплава АК7ч, кристаллизующегося в условиях действия поля центробежных сил и различного теплоотвода со стороны формообразующих поверхностей оснастки.

4. Разработаны технологические рекомендации для получения отливок со свободной поверхностью типа «втулка» из алюминиевого сплава АК7ч.

5. Разработан, изготовлен и внедрен в учебный процесс экспериментальный стенд центробежного литья с вертикальной осью вращения, в состав которого включены устройства, позволяющие контролировать основные параметры процесса.

### **Публикации по теме диссертации**

1. Лукьянов, А.А. Разработка конструкции экспериментального стенда для исследования процессов центробежного литья/ А.А. Лукьянов, В.В.Черномас// Научно–техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46–й научно–технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 1–15 апреля 2016 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО "КнАГТУ", 2016. – С.359–360.

2. Лукьянов, А.А. Разработка экспериментальной методики определения рациональных режимов центробежного литья алюминиевых сплавов/ А.А. Лукьянов, В.В.Черномас// Научно–техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46–й научно–технической

конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 1–15 апреля 2016 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО "КнАГТУ", 2016. – С.361–362.

3. Лукьянов, А.А. Разработка конструкции лабораторного стенда для изучения процессов центробежного литья/ А.А. Лукьянов, В.В.Черномас// Инженерно-технологическое образование как средство социализации современной молодежи: материалы регионального научно-практического семинара, Комсомольск-на-Амуре, 28 апреля 2016 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО "АмГПГУ", 2016. – С.68–69.

4. Лукьянов, А.А. Разработка методики проведения лабораторных работ для изучения процессов центробежного литья алюминиевых сплавов/ А.А. Лукьянов, В.В.Черномас// Инженерно-технологическое образование как средство социализации современной молодежи: материалы регионального научно-практического семинара, Комсомольск-на-Амуре, 28 апреля 2016 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО "АмГПГУ", 2016. – С.70–71.