

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.74.01

**ЛУЩИК  
ПАВЕЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КИНЕТИКИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ  
ОТЛИВОК ИЗ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СИЛУМИНОВ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.16.04 – Литейное производство

Минск, 2018

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **РАФАЛЬСКИЙ Игорь Владимирович**,  
доцент, кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Металлургия черных и цветных  
сплавов» Белорусского национального  
технического университета

Официальные оппоненты: **ПАВЛЮКЕВИЧ Николай Владимирович**,  
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор  
физико-математических наук, главный научный  
сотрудник ГНУ «Институт тепло- и  
массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси;

**САДОХА Мечислав Антонович**,  
кандидат технических наук, заместитель  
директора по научной работе ОАО  
«БЕЛНИИЛИТ»


Оппонирующая организация Государственное научное учреждение  
«Институт технологии металлов Национальной  
академии наук Беларуси»

Защита состоится «05» октября 2018 г. в 13.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.14 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря (+37517) 292-81-85, e-mail: vm.konstantinov@bntu.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «03» сентября 2018 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
доктор технических наук, профессор



В.М. Константинов

© Лущик П.Е., 2018  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей литейного производства является создание конкурентоспособных изделий, обладающих низкой металлоемкостью, высоким качеством и минимальной себестоимостью изготовления. Решение этой задачи обеспечивается в определенной степени на стадии проектирования технологических процессов производства литых изделий, что обусловило широкое использование в этих отраслях алюминиевых литейных сплавов и литых композиционных материалов. Основными способами упрочнения литейных алюминиевых сплавов является их легирование, термическая обработка и модифицирование. Применительно к литейным сплавам системы алюминий-кремний (силуминам) модифицирование стало обязательной составляющей технологического процесса при получении отливок в кокиль и разовые литейные формы. Для разработки технологии производства отливок на предприятиях широко используются такие компьютерные программы, как ProCAST (ESI Group, Франция), QuikCAST (ESI Group, Франция), MAGMASOFT (MAGMA Giessereitechnologie GmbH, Германия), СКМ ЛП «ПолигонСофт» (ООО «Полигон» Россия), LVMFlow (НПО МКМ, Россия), позволяющие моделировать процесс заполнения литейной формы, определять изменение температуры расплава в ходе его затвердевания, останавливать места образования усадочных дефектов, рассчитывать внутренние напряжения, которые могут быть причиной образования горячих трещин.

К сожалению, существующие компьютерные программы содержат значения теплофизических свойств для усредненного состава сплава при равновесных условиях кристаллизации и при широком интервале содержания основных компонентов сплава и примесей. В реальных условиях результаты компьютерного моделирования не отражают действительную ситуацию, что требует многократной корректировки полученных результатов моделирования.

Еще больше проблем возникает при использовании процессов модифицирования. К настоящему времени, исследованиями, выполненными в странах СНГ и за рубежом, установлено, что в результате модифицирования силуминов изменяются теплофизические характеристики сплава и его отдельных структурных составляющих, а также меняется характер кристаллизации. Данные особенности, прежде всего, влияют на значение теплофизических параметров, используемых для моделирования (температуры фазовых превращений, зависимость выделения твердой фазы от температуры, теплоемкость сплава и т.д.), что, в свою очередь, сказывается на процессе формирования усадочных дефектов. Однако существующие компьютерные программы такие изменения не учитывают и не содержат информации по теплофизическим показателям модифицированных сплавов.

Поэтому определение параметров кинетики затвердевания и теплофизических показателей модифицированных силуминов применительно к конкретным условиям охлаждения и технологическим процессам, в том числе

и при использовании комплексных модификаторов, является актуальной задачей, положительное решение которой позволит сократить время на разработку технологии получения отливок с использованием известных программ компьютерного моделирования и тем самым обеспечить более высокую конкурентоспособность отечественного литейного производства.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Исследования и результаты, положенные в основу диссертационной работы, соответствуют перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585, в частности, пункту 8.3 «Теории прочности, пластичности, формообразования и разрушения материалов, металлургические процессы черных и цветных металлов, сплавов на их основе, технологии производства литейных сплавов с использованием вторичных ресурсов на основе черных и цветных металлов» и на 2016 – 2020 годы, утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190, в частности, пункту 8. «Многофункциональные материалы и технологии».

Научные исследования проводились в рамках: ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», задание «Составы и технологические основы синтеза литейных сплавов на основе алюминия, упрочненных дисперсными композиционными материалами», № ГР 20113926, 2011–2013 гг.; ГПНИ «Конвергенция», задание «Разработка тестовой адаптивной информационной системы для неразрушающего контроля и принятия решений в литейном производстве на основе параллельного процессора с программируемой наращиваемой архитектурой, реализующей нейро-нечеткую модель вычислений», № ГР 20113548, 2011–2013 гг.; гранта Министерства образования Республики Беларусь по теме «Компьютерное моделирование двухфазной зоны в интервале кристаллизации модифицированных силуминов для управления процессом образования усадочных дефектов в отливках», № ГР 20110989, 2011 гг.; ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», по теме «Имитационное моделирование процессов литья и термообработки при изготовлении технологической оснастки литьем в керамические формы», № ГР №20161549, 2016 – 2018 гг.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является определение параметров кинетики затвердевания и установление кинетических кривых процесса кристаллизации модифицированных силуминов, обеспечивающих возможность численного моделирования процессов формирования литых изделий сложной геометрии с учетом изменения теплофизических свойств силуминов после их модифицирующей обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику определения параметров кинетики затвердевания силуминов с использованием данных однотермопарного термического анализа на основе математических моделей, не содержащих справочных данных, без дополнительных измерений теплофизических свойств сплавов в интервале их кристаллизации, обеспечивающую возможность определения кинетических кривых процесса кристаллизации многокомпонентных, сложнолегированных силуминов после их модифицирующей обработки в условиях отсутствия данных об их теплофизических свойствах и диаграмм состояния;

- исследовать влияние основных модифицирующих (Ti, Sb, Sr, P, Na) и армирующих (SiC) добавок на параметры кинетики затвердевания эвтектических сплавов системы Al-Si, обуславливающие формирование зоны усадочных дефектов в модифицированных силуминах;

- установить зависимости, связывающие количественные соотношения между технологическими параметрами и параметрами кинетики затвердевания модифицированных силуминов, в том числе соотношения между твердой и жидкой фазами в интервале кристаллизации для различных температур силуминов после их модифицирующей обработки;

- провести апробирование полученных результатов для моделирования процессов формирования отливок на основе установленных зависимостей параметров кинетики затвердевания промышленных силуминов и оптимизации технологических процессов получения отливок.

**Научная новизна** заключается:

1. В разработке новой методики определения параметров кинетики затвердевания силуминов, заключающейся в определении функциональных зависимостей комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана от температуры и времени в интервале кристаллизации сплавов и последующим расчетом кинетических кривых процесса кристаллизации. Разработанная методика отличается от известных тем, что расчет параметров кинетики затвердевания силуминов проводится на основе математических моделей, не содержащих справочных данных и приближающих функций производной температуры по времени, без дополнительных измерений теплофизических свойств сплавов в интервале их кристаллизации, что обеспечивает возможность определения кинетических кривых процесса кристаллизации многокомпонентных, сложнолегированных силуминов после их модифицирующей обработки в условиях отсутствия данных об их теплофизических свойствах и диаграмм состояния.

2. В разработке математической модели идентификации температур и времени начала и окончания фазовых превращений силуминов, в том числе после их модифицирующей обработки, с использованием функциональных зависимостей комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана от температуры и времени в интервале кристаллизации сплавов. Разработанная модель отличается от известных тем, что определение

температур и времени начала и окончания фазовых превращений силуминов проводится с использованием значений подинтегральной функции  $\theta(t)$ , используемой для расчета параметров кинетики затвердевания силуминов (условием начала кристаллизации сплава является  $\theta(t) > 0$ , окончания кристаллизации и отсутствия фазовых превращений  $\theta(t) = 0$ ), что позволяет реализовать алгоритм автоматической идентификации температуры и времени начала и окончания фазовых превращений в многокомпонентных, сложнолегированных силуминах после их модифицирующей обработки.

3. В установлении зависимостей комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана для доэвтектических, эвтектических и заэвтектических силуминов с содержанием кремния 5%, 7%, 10%, 12%, 17%, а также кинетических кривых процесса кристаллизации для силуминов с содержанием кремния 5%, 7%, 10%, 12%, 13%, 17%, 20% и многокомпонентных промышленных сплавов марок АК9, АК9ч, АК5М2, АК12М2МгН, обеспечивающих возможность численного моделирования процессов формирования литых изделий сложной геометрии с учетом изменения теплофизических свойств промышленных силуминов, в том числе после их модифицирующей обработки.

4. В установлении зависимостей, связывающих количественные соотношения между технологическими параметрами и параметрами кинетики затвердевания модифицированных силуминов, в том числе соотношений между твердой и жидкой фазами в интервале кристаллизации для различных температур силуминов после их модифицирующей обработки (Ti, Sb, Sr, P, Na), ввода армирующих добавок (SiC), использование которых при имитационном моделировании литейных процессов позволяет обеспечить высокую сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных, в том числе при образовании усадочных дефектов в отливках до 60% точнее, чем при использовании данных диаграмм состояния сплавов.

5. В разработке новых способов комплексного модифицирования Al-Si сплавов, включающих введение в расплав смеси неметаллических дисперсных частиц SiC. Способы обеспечивают улучшение процесса усвоения модифицирующих компонентов до 90% и увеличение механических свойств полученного сплава до 30%.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика определения параметров кинетики затвердевания и математическая модель идентификации температур и времени начала и окончания фазовых превращений силуминов с использованием данных термического анализа пробы расплава с учетом изменения функциональных зависимостей комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана, обеспечивающая возможность определения кинетических кривых процесса кристаллизации многокомпонентных, сложнолегированных силуминов после их модифицирующей обработки в условиях отсутствия данных об их теплофизических свойствах и диаграмм состояния.

2. Установленные зависимости значений комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана для доэвтектических, эвтектических и заэвтектических силуминов с содержанием кремния 5%, 7%, 10%, 12%, 17%, а также кинетические кривые процесса кристаллизации для силуминов с содержанием кремния 5%, 7%, 10%, 12%, 13%, 17% и 20%, многокомпонентных промышленных сплавов марок АК9, АК9ч, АК5М2, АК12М2MgH, обеспечивающие возможность численного моделирования процессов формирования литых изделий сложной геометрии с учетом изменения теплофизических свойств силуминов после их модифицирующей обработки.

3. Экспериментально установленные зависимости, связывающие количественные соотношения между технологическими параметрами и параметрами кинетики затвердевания модифицированных силуминов, в том числе соотношений между твердой и жидкой фазами в интервале кристаллизации для различных температур силуминов после их модифицирующей обработки (Ti, Sb, Sr, P, Na), ввода армирующих добавок (SiC), использование которых при имитационном моделировании литейных процессов позволяет обеспечить высокую сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных, в том числе при образовании усадочных дефектов в отливках до 60% точнее, чем при использовании данных диаграмм состояния сплавов.

4. Результаты экспериментальных и теоретических исследований межфазного взаимодействия расплава алюминия с дисперсными частицами карбида кремния, позволившие разработать способы получения армирующе-модифицирующей композиционной добавки и модифицирования Al-Si сплавов, включающие введение в расплав смеси неметаллических дисперсных частиц SiC, обеспечивающие улучшение процесса их усвоения до 90% и увеличение механических свойств полученного сплава до 30%.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке и написании публикаций по теме диссертации, апробации разработанной определения параметров кинетики затвердевания с использованием данных компьютерного термического анализа при моделировании процессов изготовления отливок, формулировке выводов работы.

Работа выполнена соискателем под руководством к.т.н., доцента И.В. Рафальского, которому принадлежит постановка цели и задач исследований, формулировка и математическое описание общей концепции решения задачи расчета содержания твердой фазы в затвердевающих расплавах с использованием данных однотермопарного термического анализа без применения ньютоновской модели базовой линии путем сведения всех теплофизических параметров к одному комплексному коэффициенту, а также общее научное руководство исследованиями.

Соавторы совместных работ д.т.н., профессор Немененок Б.М., к.т.н., доцент Довнар Г.В., принимали участие в обсуждении и выработке рекомендаций для практического использования результатов работы. Остальные соавторы занимались изучением вопросов, не затрагивающих тему и положений, выносимых на защиту диссертационной работы.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих республиканских и международных научно-технических конференциях и семинарах: Международный докторский семинар «International Doctoral Seminar» (г. Трнава, Словакия) 2007 – 2010 гг.; II Международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве», (г. Краматорск, 7 – 11 сентября 2009 г.); Международная научно-техническая конференция «Неметаллические включения и газы в литейных сплавах», (Запорожье, 2006, 2009 гг.); Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штампового производств» (г. Барнаул, 2009 гг.); Международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2009, 2013 гг.); Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь» (г. Минск, 2017г.). Разработанное в результате исследований программное обеспечение расчета теплофизических свойств сплавов на основе данных термического анализа и базы данных теплофизических свойств сплавов внедрены на предприятии ЗАО «БелВирТел». По результатам работы получен акт о практическом использовании (внедрении) результатов диссертационного исследования в НИИЛ «Литейные технологии» филиала БНТУ «Научно-исследовательская часть». Полученные в результате исследования данные внедрены в учебный процесс в виде лабораторной работы по учебной дисциплине «САПР технологических процессов».

### **Опубликование результатов диссертации**

Результаты исследований опубликованы в 45 научных работах, в том числе: 15 статей в научно-технических журналах, из них 5 – в зарубежных изданиях, и 10 – в научных изданиях, включенных в перечень, рекомендованный ВАК Республики Беларусь; 26 материалов конференций и тезисов докладов (за рубежом – 13), получено 4 патента на изобретения. Общий объем материалов, опубликованных по теме диссертации, составляет 6,2 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации составляет 231 страница, включая 118 рисунков, 22 таблицы, библиографический список из 114 наименований на 10 страницах, список публикаций автора из 45 наименований на 6 страницах, 13 приложений на 59 страницах.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **первой главе** описаны проблемы имитационного моделирования процессов формирования литых изделий. В настоящее время моделирование можно проводить, используя как аналитические, так и численные методы. Моделирование процессов затвердевания литых изделий сложной конфигурации аналитическими методами представляет собой чрезвычайно сложную и во многих случаях не подлежащую решению задачу. В главе приводится анализ численных методов решения нестационарного уравнения теплопроводности с внутренним источником тепловыделения. Отмечено, что для сплавов, претерпевающих фазовый переход из жидкого в твердое состояние, численное решение задач охлаждения, затвердевания и образования усадочных дефектов невозможно без предварительного определения функции образования и роста твердой фазы  $f_s(t)$ . Приведен анализ методов определения  $f_s(t)$ . Отмечено, что значительно повысить оперативность и точность определения содержания твердой фазы в жидко-твердофазной смеси расплава с выделяющимися при затвердевании твердыми кристаллами можно при использовании методов компьютерного термического анализа (КТА) пробы расплава или Computer-Aided Cooling Curve Analysis (CA-CCA).

Приведен анализ методов определения содержания твердой фазы в жидко-твердофазной смеси расплава на основе КТА. Установлено, что существующие способы определения содержания твердой фазы с использованием термического анализа на основе теплофизических моделей Ньютона-Рихмана и Фурье обладают рядом недостатков, связанными со сложностями в определении функций «базовой линии» и использованием допущений о постоянстве физических и теплофизических свойств в интервале кристаллизации сплава.

В главе также приведен анализ влияния модифицирующей обработки расплава на процесс затвердевания и результаты имитационного моделирования процессов формирования отливок из силуминов. Системный анализ влияния модификаторов алюминий-кремниевых сплавов на затвердевание позволяет утверждать, что модифицирующими добавками вносятся существенные изменения в кинетику формирования двухфазной зоны, и, следовательно, оказывается влияние на формирование усадочных дефектов в отливках. Это свидетельствует о том, что разработка технологии изготовления отливки должна производиться в каждом конкретном случае только с учетом изменений кинетики кристаллизации сплава.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** приведены характеристики материалов, используемых в работе и методика проведения экспериментальных плавок, методы исследования микроструктуры, литейных и механических свойств, методика компьютерного термического анализа, а также программное обеспечение для разработки расчетных модулей и моделирования литейных процессов.

**Третья глава** посвящена разработке методики определения параметров кинетики затвердевания силуминов.

Проведено исследование и анализ кинетики затвердевания силуминов с использованием модели Ньютона:

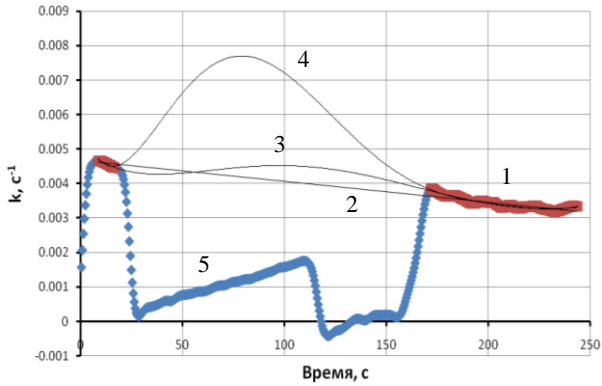
$$f_s = \frac{\int_0^t \left( \frac{dT}{dt} - Z(t) \right) dt}{\int_0^{t_s} \left( \frac{dT}{dt} - Z(t) \right) dt}, \quad (1)$$

где  $Z(t)$  – функция «базовой линии», °C /c;  $t$  – время, с;  $t_s$  – время окончания затвердевания, с;  $T$  – температура расплава, °C.

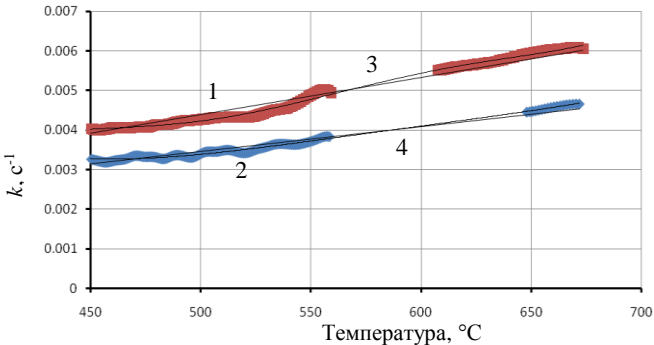
С использованием экспериментальных данных термического анализа технически чистого алюминия и доэвтектических силуминов установлено, что функция базовой линии в модели Ньютона, являющейся производной кривой охлаждения в предположении отсутствия фазовых превращений, в интервале кристаллизации исследованных сплавов носит нелинейный характер и не описывается экспоненциальными зависимостями, выведенными из уравнения Ньютона-Рихмана, в силу изменяющихся теплофизических свойств расплава. Комплексный теплофизический коэффициент Ньютона-Рихмана  $k = \alpha F / (m C_p)$  (где  $\alpha$  – эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площадь поверхности пробы, м<sup>2</sup>;  $m$  – масса пробы, кг;  $C_p$  – удельная теплоемкость пробы расплава, Дж/(кг·К)) не является величиной постоянной на участке жидкофазного состояния сплава, но нелинейно убывает с течением времени по мере снижения температуры технологической пробы.

Установлено, что функция теплофизического коэффициента  $k(t)$  для расчета содержания твердой фазы в расплавах не может быть удовлетворительно описана полиномами высокого порядка с использованием экспериментальных значений  $k(t)$ , полученных для однофазных участков кривой охлаждения сплава, поскольку при увеличении степени полиномиальной функции ( $n \geq 5$ ) проявляется колебательный, незакономерно изменяющийся характер приближающих (модельных) зависимостей (рисунок 1).

Проблема аппроксимации зависимостей коэффициента  $k(t)$  в интервале кристаллизации широкоинтервальных сплавов решена в работе путем перехода к рассмотрению температурной, а не временной зависимости коэффициента в виде полиномов  $n$ -й степени, коэффициенты которых рассчитывались методом наименьших квадратов, используя полученные значения  $k(T)$  для однофазных участков сплава. При этом экспериментально показано, что увеличение степени приближающих полиномов не приводит к существенным изменениям модельных функций  $k(T)$ , что свидетельствует о возможности удовлетворительной аппроксимации температурной зависимости значений комплексного теплофизического коэффициента  $k$  полиномами  $n$ -й степени ( $n < 5$ ) с использованием экспериментальных данных, полученных для однофазных участков кривой охлаждения (рисунок 2).



**Рисунок 1.** – Зависимость теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана ( $k$ ) в интервале затвердевания сплава Al-5%Si для однофазных участков кривой охлаждения (1), расчетные зависимости приближающих функций (2 – линейная зависимость; 3 – полином 5-го порядка; 4 – полином 6-го порядка) и для интервала затвердевания с учетом выделившейся теплоты кристаллизации (5)



**Рисунок 2.** – Температурная зависимость значений коэффициента Ньютона-Рихмана для однофазных участков (1,2 - экспериментальные данные) и интервала кристаллизации сплавов Al-5% Si (2) и Al-10% Si (1) (3,4 – расчетные данные, полученные с использованием линейных уравнений и полиномов 5-го порядка)

Поскольку исходные данные – это результаты последовательных измерений температуры и времени, то каждому моменту времени в интервале кристаллизации сплава соответствует определенная температура и, таким образом, найденное значение теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана.

Установлено, что температурные зависимости значений комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана  $k$  для сплавов доэвтектического, эвтектического и заэвтектического составов (Al-7% Si, Al-12% Si, Al-17% Si) при различных скоростях охлаждения сплавов уменьшаются по закону, близкому к линейному, при снижении температуры сплавов. При снижении скорости охлаждения технологической пробы расплава значения коэффициента Ньютона-Рихмана  $k$  также уменьшаются, при этом снижается и разность значений этого параметра, соответствующих температурам ликвидус и солидус.

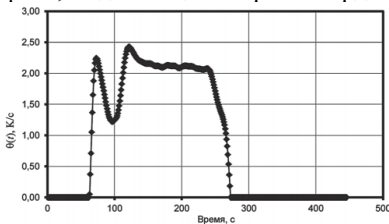
Определение функциональной зависимости теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана от температуры  $k(T)$  и времени  $k(t)$  обеспечивает возможность расчета функции содержания твердой фазы в расплавах без вычисления ньютоновской функции базовой линии с учетом изменяющихся физических свойств расплава:

$$f_S(t) = \frac{\int_0^t \left( \frac{dT}{dt} + k \cdot (T(t) - T_0) \right) dt}{\int_0^{t_S} \left( \frac{dT}{dt} + k \cdot (T(t) - T_0) \right) dt}, \quad (2)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды, °С.

Разработанная методика определения параметров кинетики затвердевания силуминов включает процесс получения температурно-временной зависимости сплава; вычисление производной первого порядка; построение температурной зависимости  $k(T) = -\frac{dT/dt}{T - T_0}$  и определение однофазных участков;

аппроксимация температурной зависимости комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана полиномом  $n$ -й степени и расчет его значений в интервале кристаллизации сплава с использованием данных температурных измерений; формирование массивов данных параметров кинетики затвердевания для каждого момента времени, в том числе содержания твердой фазы, выделяющейся при затвердевании.



**Рисунок 3. – Зависимость  $\theta(t)$  от времени для сплава Al-10%Si**

Предложена математическая модель идентификации температур и времени начала и окончания фазовых превращений силуминов на основе анализа зависимости подынтегральной функции  $\theta(t)$ , используемой для расчета удельной теплоты кристаллизации:

$$\theta(t) = k(t) \cdot (T - T_0) + \frac{dT}{dt}, \quad (3)$$

Условием начала кристаллизации сплава является  $\theta(t) > 0$ , окончания кристаллизации и отсутствия фазовых превращений  $\theta(t) = 0$ . Наличие четких правил

определения однофазных участков кривой охлаждения позволяет однозначно идентифицировать временной интервал затвердевания сплава (рисунок 3).

С использованием разработанной методики определения параметров кинетики затвердевания силуминов установлены зависимости значений комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана для силуминов с содержанием кремния 5%, 7%, 10%, 12%, 17% и содержания твердой фазы, выделяющейся при затвердевании для силуминов с содержанием кремния 5%, 7%, 10%, 12%, 13%, 17% и 20%, промышленных сплавов марок АК9, АК9ч, АК5М2, АК12М2МгН от температуры и времени.

Разработан и изготовлен в Государственном предприятии «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» программно-аппаратный комплекс для термического анализа сплавов, а также программное обеспечение для расчета теплофизических свойств сплавов в интервале их кристаллизации. Разработанное программное обеспечение предназначено для комплексного определения функциональных зависимостей содержания твердой фазы и других физических свойств (теплоемкости, плотности и др.) от температуры в интервале затвердевания сплавов с использованием данных термического анализа с возможностью последующего экспорта расчетных зависимостей в системы компьютерного моделирования литейных процессов (номер государственной регистрации в едином реестре Национального центра интеллектуальной собственности Республики Беларусь № 490).

**Четвертая глава** посвящена исследованию процессов формирования двухфазной зоны в интервале кристаллизации модифицированных сплавов системы Al-Si с использованием описанной в главе 3 методики. Представлены результаты исследования влияния скорости охлаждения алюминий-кремниевых сплавов, модифицированных добавками Na, Sr и Sb, на процесс затвердевания и образования твердой фазы.

В качестве объекта исследования выбраны сплавы системы Al-Si с содержанием кремния – 7%, 12% и 17%. Термический анализ проводился при естественном охлаждении расплава в тигле на воздухе, при различных скоростях охлаждения (0,5; 2 и 3 °C/c) технологической пробы расплава.

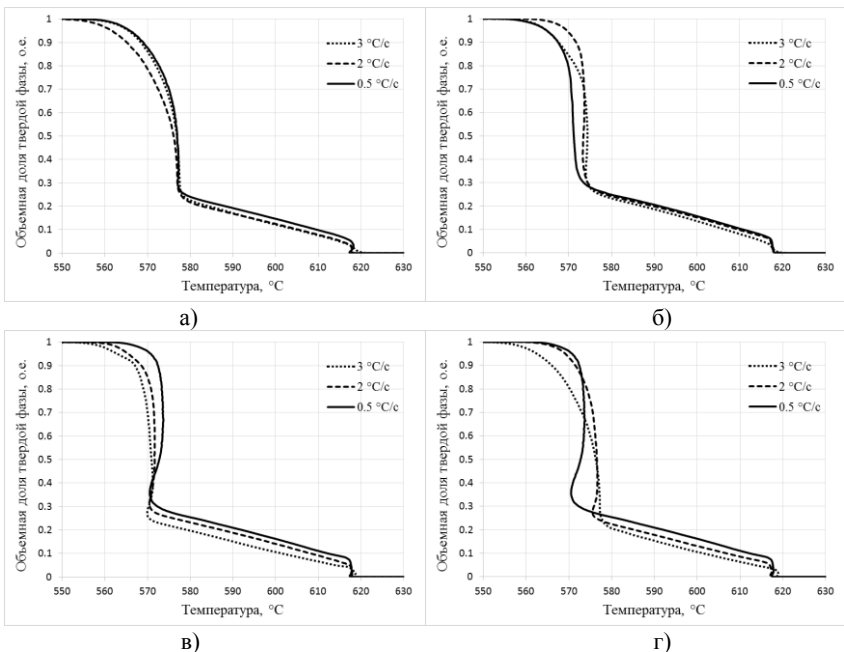
В результате обработки кривых охлаждения сплавов с использованием разработанного ПО были построены зависимости содержания твердой фазы от температуры для немодифицированных и модифицированных сплавов с различным содержанием кремния – 7%, 12% и 17%, при разных скоростях охлаждения образцов. На рисунке 4 представлены зависимости для сплавов с содержанием кремния 7%.

Для сплавов с содержанием кремния 7% установлено, что при вводе модифицирующих добавок на основе Na, Sr, Sb процесс затвердевания в области эвтектического превращения существенно изменяется не только по значениям температур, но и по характеру протекания процесса. И если при затвердевании исходного состава сплава образование эвтектики происходит постепенно с непрерывным падением температуры, то при модифицировании

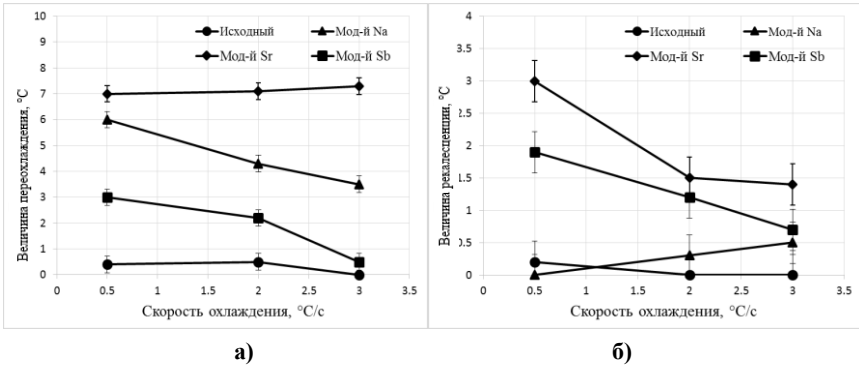
расплава (в особенности Sr и Sb) после переохлаждения происходит весьма резкое повышение температуры – большее чем отводится окружающей средой от образца (рекалесценция). На рисунке 5 значения величин переохлаждения и рекалесценции для образцов с различной обработкой расплава сведены в графики зависимостей от скорости охлаждения.

Установлено, что наибольшее переохлаждение наблюдается для образцов, обработанных Sr и Na. При этом наибольшие значения рекалесценции наблюдаются у образцов Sr и Sb. Для данных образцов видна тенденция снижения значений рекалесценции при увеличении скорости охлаждения.

Замедление начала эвтектического превращения с последующим высвобождением значительного количества энергии можно объяснить «взрывным» характером протекания эвтектического превращения, с образованием в относительно короткий промежуток времени большого количества зародышей твердой фазы, при этом размер составляющих этой фазы будет существенно меньше, чем у исходного состава сплава, что важно для обеспечения высоких механических свойств отливки.

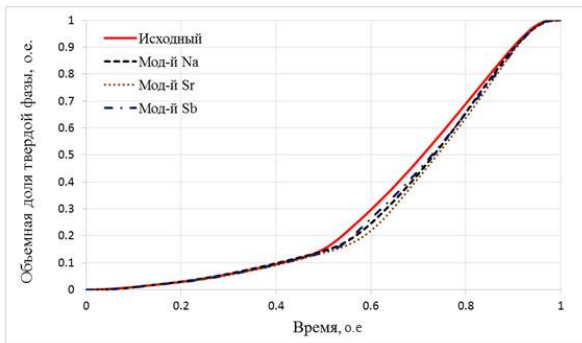


а) без модифицирующей обработки; б) после модифицирования Na;  
в) после модифицирования Sr; г) после модифицирования Sb  
Рисунок 4. – Зависимости содержания твердой фазы от температуры сплава Al-7%Si, при разных скоростях охлаждения образцов



**Рисунок 5. – Влияние модифицирования и скорости охлаждения сплава Al-7%Si на величину переохлаждения (а) и рекалесценции (б)**

С использованием разработанной методики установлены кривые кинетики кристаллизации модифицированных (Na, Sr, Sb) и немодифицированных эвтектических, до- и заэвтектических Al-Si сплавов. На рисунке 6 представлены кривые кинетики кристаллизации сплава Al-7%Si при скорости охлаждения образцов 0,5°C/c (шкала времени на графике является нормированной по всему интервалу процесса затвердевания). Установлено, что исследуемые модифицирующие добавки практически не влияют на характер затвердевания  $\alpha$ -твердого раствора, однако наблюдается замедление роста эвтектической составляющей сплава с дальнейшей интенсификацией процесса выделения твердой фазы к концу интервала затвердевания. На основании анализа установленных зависимостей следует, что в результате торможения модифицирующими добавками образования эвтектики  $\alpha$ -твердый раствор способен увеличить свою долю в конечной структуре на 3-5%.



**Рисунок 6. – Кривые кинетики кристаллизации модифицированных и немодифицированных сплавов состава Al-7%Si (скорость охлаждения 0,5°C/c)**

Для сплавов с содержанием кремния 12% установлено, что наибольшие значения переохлаждения и рекалесценции имеют образцы, модифицированные Sr и Sb. Выявлено, что данные параметры кинетики затвердевания в большей степени зависят от вида и степени усвоения модификатора, чем от скорости охлаждения. Для эвтектических сплавов установлено, что все исследованные модификаторы способствуют замедлению образования и роста эвтектики Al-Si, однако с течением времени по мере снижения температуры данный процесс интенсифицируется.

Для заэвтектических сплавов (17% Si) установлено, что все исследованные модификаторы существенно увеличивают значения переохлаждения в области эвтектического превращения. Отмечается появление переохлаждения и на исходном составе, что может быть связано с локальным дефицитом кремния для активации образования эвтектики из-за продолжающегося роста кристаллов первичного кремния. При этом в заэвтектическом сплаве исходный (немодифицированный) состав имеет наибольшие значения рекалесценции.

Анализ кинетики затвердевания заэвтектического состава сплава позволил установить сохранение эффекта торможения процесса эвтектического превращения модифицирующими добавками (исключение составляет Sb).

В главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния модифицирующей обработки на процесс формирования двухфазной зоны в интервале кристаллизации силуминов и образования усадочных дефектов в технологических пробах для КТА. Сравнительный анализ процесса затвердевания эвтектических силуминов и образования усадочных дефектов показал, что при введении модифицирующих добавок Ti, Sb, Sr, P, Na и дисперсных тугоплавких частиц, формирование зоны усадочных дефектов в сплавах системы Al-Si эвтектического состава происходит различным образом: титан не оказывает заметного влияния на положение и размеры зоны образования усадочных дефектов, что хорошо согласуется с теоретическими представлениями о влиянии микродобавок титана на процесс эвтектической кристаллизации силуминов; сурьма и стронций оказывают схожее влияние на процесс формирования усадочных дефектов в образцах из сплава Al-Si эвтектического состава – рассеивают усадочную пористость по всему объему образца; натрий, фосфор и дисперсные тугоплавкие частицы увеличивают зону усадочной пористости в осевом направлении.

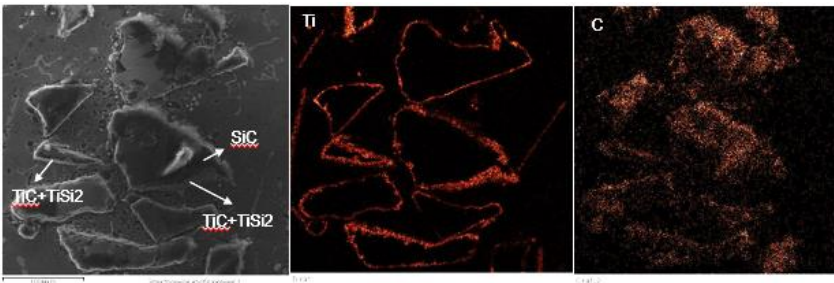
Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния комплексных модификаторов с дисперсными соединениями карбида кремния на затвердевание силуминов и результаты анализа механизма взаимодействия частиц SiC с расплавом алюминия.

Разработаны способы получения композиционного материала на основе алюминия включающий введение в расплав тугоплавких частиц в интервале температур кристаллизации расплава (патенты Республики Беларусь №19815 и №20184). Ввод дисперсных тугоплавких частиц в интервале кристаллизации расплава с последующим затвердеванием модифицирующих лигатур



теоретически обоснован расчетом их термонапряженного состояния. Выполненные расчеты показали, что при равномерном распределении частиц в единичном объеме матричного расплава, после начала затвердевания на них оказывается повышенное давление, обусловленное термическим сжатием алюминиевой матрицы. Такое термонапряженное состояние способствует активации поверхности частиц на границе контакта с матрицей.

Анализ процесса взаимодействия дисперсных неметаллических частиц SiC с алюминиевым расплавом, легированным Ti, с использованием рентгенофлуоресцентной спектроскопии показал, что частицы карбида кремния взаимодействуют в расплаве алюминия с титаном с образованием на поверхности частиц карбидов тонких слоев, содержащих дисперсные кристаллические фазы с высоким содержанием Ti, C, Si и Al, толщина которых (1-10 мкм) определяется концентрацией титана и параметрами температурного режима обработки расплава (900-950°C, выдержка до 60 мин.). Такая поверхностная «оторочка» (рисунок 7) позволяет расплаву алюминия смачивать частицы карбида кремния даже после последующих переплавов, не позволяя им отслаиваться от алюминиевой матрицы. Предполагается, что именно образующиеся дисперсные кристаллические фазы обеспечивают эффект модифицирования структуры силицидов, являясь, по сути центрами кристаллизации первичного кремния.



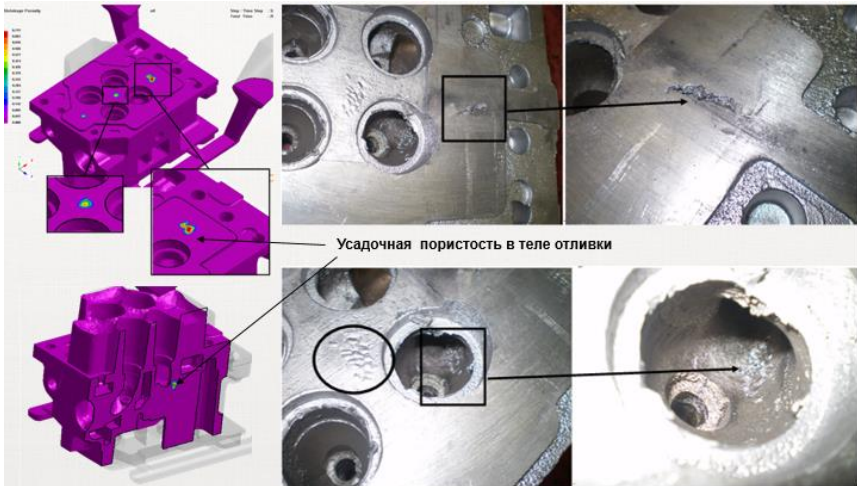
**Рисунок 7. – Область рентгенофлуоресцентного анализа микроструктуры пограничного участка компонентов «карбид кремния – алюминиевая матрица» сплава Al-1%Ti-10%SiC**

Проведены исследования по определению принципиальной возможности измельчения основных фазовых составляющих структуры алюминий-кремниевых сплавов с использованием дисперсных неметаллических включений по предложенному способу. Исследование процесса затвердевания алюминий-кремниевых сплавов после обработки полученными модифицирующими добавками, состоящими из металлической основы и дисперсного наполнителя проводилось на до- и за эвтектических составах сплавов системы Al-Si (до 20%Si). Установлено, что добавки оказывают эффект, выраженный в изменении характера затвердевания сплавов, и

изменения микроструктуры исследуемых сплавов. Предложен способ (патент Республики Беларусь №188610) модифицирования Al-Si сплавов, включающий введение в расплав смеси неметаллических дисперсных частиц SiC, обеспечивающие улучшение процесса усвоения модифицирующих компонентов до 90% и увеличение механических свойств сплава до 30%.

В **пятой главе** проведено апробирование полученных результатов исследований при разработке технологии изготовления отливок из силуминов.

Проведена оптимизация технологии получения отливок «Головка блока цилиндров» из сплава АК9ч позволяющая существенно сократить брак по усадочным дефектам. На основе имитационного моделирования литейных процессов проведен сравнительный анализ процесса образования усадочных дефектов в отливке «Головка блока цилиндров» с использованием и без использования разработанной методики определения параметров кинетики затвердевания силуминов. Анализ и верификация расчетов (рисунок 8) подтвердили необходимость использования разработанных методик и программно-аппаратных средств КТА для увеличения сходимости расчетных данных с реальным экспериментом и сокращения времени на предпроектную подготовку.



**Рисунок 8. – Верификация процесса имитационного моделирования получения отливки «Головка блока цилиндров» с использованием экспериментальных данных**

Проведен сравнительный численный анализ технологий получения отливок «Заготовка втулки», «Заборник», «Крышка» и «Корпус» изготавливаемых в НИИЛ «Литейные технологии» филиала БНТУ «Научно-исследовательская часть» с использованием и без использования разработанной методики определения параметров кинетики затвердевания силуминов. Установлено, что

применение разработанных программно-аппаратных средств термического анализа, методики определения параметров кинетики затвердевания и расчета кинетических кривых процесса кристаллизации силуминов обеспечивают возможность достоверного моделирования литейных процессов при получении отливок из многокомпонентных, сложнолегированных силуминов, в том числе полученных с применением вторичного сырья, после их модифицирующей обработки в условиях отсутствия данных об их теплофизических свойствах и диаграмм состояния.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработана и практически реализована новая методика определения параметров кинетики затвердевания силуминов с использованием данных однотермопарного термического анализа пробы расплава, заключающаяся в определении функциональных зависимостей комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана от температуры и времени в интервале кристаллизации сплавов и последующим расчетом кинетических кривых процесса кристаллизации. Разработанная методика отличается от известных тем, что расчет параметров кинетики затвердевания силуминов, включающий определение количественного соотношения твердой и жидкой фаз для заданных значений температур и времени при затвердевании расплавов силуминов, проводится на основе математических моделей, не содержащих справочных данных и приближающих функций производной температуры по времени, без дополнительных измерений теплофизических свойств сплавов в интервале их кристаллизации, что обеспечивает возможность определения кинетических кривых процесса кристаллизации многокомпонентных, сложнолегированных силуминов после их модифицирующей обработки в условиях отсутствия данных об их теплофизических свойствах и диаграмм состояния [2, 9, 10, 40, 41].

2. Предложена математическая модель идентификации температур и времени начала и окончания фазовых превращений силуминов, в том числе после их модифицирующей и рафинирующей обработки, с использованием функциональных зависимостей комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана от температуры и времени в интервале кристаллизации сплавов. Разработанная модель отличается от известных тем, что определение температур и времени начала и окончания фазовых превращений силуминов проводится с использованием значений подынтегральной функции  $\theta(t)$ , используемой для расчета параметров кинетики затвердевания силуминов (условием начала кристаллизации сплава является  $\theta(t) > 0$ , окончания кристаллизации и отсутствия фазовых превращений  $\theta(t) = 0$ ), что позволило реализовать алгоритм автоматической идентификации температуры и времени начала и окончания фазовых превращений с высокой разрешающей способностью (по температуре до 0,1 °С, по времени до 0,2 с) в

многокомпонентных, сложнолегированных силуминах после их модифицирующей обработки [9, 10, 26, 41].

3. Впервые с использованием разработанной методики определения параметров кинетики затвердевания силуминов установлены зависимости значений комплексного теплофизического коэффициента Ньютона-Рихмана для доэвтектических, эвтектических и заэвтектических силуминов с содержанием кремния 5%, 7%, 10%, 12%, 17%, а также кинетические кривые процесса кристаллизации для силуминов с содержанием кремния 5%, 7%, 10%, 12%, 13%, 17%, 20% и многокомпонентных промышленных сплавов марок АК9, АК9ч, АК5М2, АК12М2МгН, обеспечивающие возможность численного моделирования процессов формирования литых изделий сложной геометрии с учетом изменения теплофизических свойств силуминов после их модифицирующей обработки [1, 2, 8 – 11, 18, 26 – 28, 31, 33, 40, 41].

4. С использованием разработанной методики определения параметров кинетики затвердевания силуминов выполнен анализ влияния модифицирующих (Ti, Sb, Sr, P, Na) и армирующих добавок (SiC) на параметры кинетики затвердевания эвтектических сплавов системы Al-Si, обуславливающие формирование зоны усадочных дефектов в модифицированных силуминах. Установлены зависимости, связывающие количественные соотношения между технологическими параметрами и параметрами кинетики затвердевания модифицированных Na, Sr, Sb силуминов с содержанием кремния 7%, 12% и 17%, в том числе соотношения между твердой и жидкой фазами в интервале кристаллизации для различных температур силуминов после их модифицирующей обработки, использование которых при имитационном моделировании позволило обеспечить высокую сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных, в том числе при образовании усадочных дефектов в отливках до 60% точнее, чем при использовании данных диаграмм состояния сплавов [2 – 4, 6, 7, 9, 10, 12, 16, 17, 24, 25, 27, 30, 35, 38, 41].

5. Проведены экспериментальные и теоретические исследования межфазного взаимодействия расплава алюминия с дисперсными частицами карбида кремния. Установлено, что частицы карбида кремния взаимодействуют в расплаве алюминия с титаном с образованием на поверхности частиц карбидов поверхностных слоев, содержащих дисперсные кристаллические фазы с высоким содержанием Ti, C, Si и Al, толщина которых (1-10 мкм) определяется концентрацией титана и параметрами температурного режима обработки расплава (900-950°C, выдержка до 60 мин.). Образующиеся дисперсные кристаллические фазы обеспечивают эффект модифицирования структуры силуминов при использовании комплексных модификаторов с дисперсными частицами SiC. Полученные результаты позволили разработать способы получения армирующе-модифицирующей композиционной добавки и модифицирования Al-Si сплавов, включающие введение в расплав смеси неметаллических дисперсных частиц SiC, обеспечивающие улучшение

процесса их усвоения до 90% и увеличение механических свойств полученного сплава до 30%. Способы апробированы при производстве литых изделий сложной конфигурации из сплавов АК7ч и АК12 [7, 8, 12, 13, 36, 37, 43, 44, 45].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанные методика определения параметров кинетики их затвердевания и расчета кинетических кривых процесса кристаллизации, программно-аппаратный комплекс для термического анализа сплавов могут быть использованы для предпроектного анализа и компьютерного моделирования процессов литья с целью повышения качества отливок и устранения литейных дефектов, что подтверждено результатами их применения на предприятии ЗАО «БелВирТеЛ» при разработке технологий получения отливок из сплавов АК9, АК9 (модифицированный), АК9ч, АК9ч (модифицированный), АК5М4, АК5М4 (модифицированный), АК12М2МгН, АК12М2МгН (модифицированный) [5, 10, 14, 15, 19 – 24, 29, 30, 32, 34, 39].

2. В ходе апробирования результатов исследования была проведена оптимизация технологии получения отливок «Головка блока цилиндров» из сплава АК9ч, позволяющая существенно сократить брак по усадочным дефектам. На основе имитационного моделирования литейных процессов проведен сравнительный анализ процесса образования усадочных дефектов в отливках «Головка блока цилиндров» с использованием существующих и разработанной методики определения параметров кинетики затвердевания силуминов. Анализ подтвердил эффективность использования разработанной методики, обеспечив высокую сходимость расчетных данных с реальным экспериментом [10].

3. С использованием средств компьютерного моделирования литейных процессов и разработанной методики определения параметров кинетики затвердевания силуминов был проведен анализ технологии получения отливки «Заборник», изготавливаемой в НИИЛ «Литейные технологии» филиала БНТУ «Научно-исследовательская часть». Определен наиболее приемлемый вариант изготовления отливки с точки зрения снижения вероятности образования усадочных дефектов. Изготовлена опытная партия отливок. В результате проведенных исследований удалось сократить брак по герметичности в отливках на 90%. Использование результатов диссертационных исследований для предпроектного анализа и диагностики технологических процессов изготовления отливок из алюминий-кремниевых сплавов, полученных под руководством И.В. Рафальского (вклад автора 50 %), обеспечило НИИЛ «Литейные технологии» филиала БНТУ «Научно-исследовательская часть» в период с 2012 по 2017 гг. выполнение хозяйственных договоров на сумму 47 471,27 бел.руб. Получено прибыли на сумму 3 683,03 бел.руб.

4. Полученные в результате исследования данные внедрены в учебный процесс в виде лабораторной работы по учебной дисциплине «САПР технологических процессов».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных журналах

1. Термический анализ модифицированных магнийсодержащих силуминов с различным типом модификатора / И.В. Рафальский, Г.В. Довнар, С.В. Киселев, П.Е. Лущик, А.В. Бельский // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 4. – С.113–115.
2. Рафальский, И.В. Применение компьютерного термического анализа для моделирования процессов затвердевания отливок из алюминиевых сплавов / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик, А.В. Арабей // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 1, Ч.2. – С.115–122.
3. Некоторые аспекты технологического процесса литья в облицованный кокиль / А.Н. Крутилин, Р.Э. Трубицкий, И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 1, Ч.2. – С.88–95.
4. О механизме формирования структурных составляющих при кристаллизации модифицированной эвтектики в силуминах / А.М. Галушко, И.В. Рафальский, П.Е. Лущик, С.П. Королев, В.М. Михайловский, А.Г. Шешко // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 4. – С.95–99.
5. Опыт применения комплекса экспериментальных средств термического анализа для верификации расчетной модели технологического процесса литья» / П.Е. Лущик, И.В. Рафальский, А.В. Заблоцкий, К.Л. Калошин, Н.В. Романова, Т.А. Стешиц // *Научный журнал «KZ: ZHAS GALYM»*. – 2011. – № 3. – С. 77–86.
6. Лущик, П.Е. Влияние модифицирования силуминов на процесс образования усадочных дефектов / П.Е. Лущик, И.В. Рафальский // *Ползуновский альманах*. – 2011. – №4. – С. 93–96.
7. Лущик, П.Е. Влияние дисперсных добавок карбидов на морфологию кремния в силуминах / П.Е. Лущик, И.В. Рафальский // *Ползуновский альманах*. – 2011. – №4. – С. 120–122.
8. Лущик, П.Е. Армирующие и модифицирующие лигатуры на основе литых композиционных материалов системы Al–Ti–SiC / П.Е. Лущик, И.В. Рафальский // *Ползуновский альманах*. – 2012. – №1. – С. 24–27.
9. Рафальский, И.В. Расчет двухфазной зоны в интервале кристаллизации алюминиевых сплавов с использованием термического анализа / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 1. – С. 79–83.
10. Лущик, П. Е. Термосенсорная диагностика процесса затвердевания сплава АК9ч при разработке технологии получения бездефектных отливок / П. Е. Лущик // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 3 (67). – С. 281 – 285.
11. Морозов, Д.С. Контроль металлургических процессов при производстве отливок из сплавов на основе алюминия с использованием данных компьютерного термического анализа / Д. С. Морозов, П. Е. Лущик, И. В. Шестюк // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 3 (спецвыпуск). – С. 286–290.
12. Лущик, П.Е. Исследование влияния модифицирующих и армирующих добавок на процесс затвердевания и формирование зоны усадочных дефектов в

эвтектических силуминах / П.Е. Лущик, И.В. Рафальский // *Металл и литье Украины*. – 2013. – №4 (239). – С. 7–11.

13. Межфазное взаимодействие компонентов алюмоматричных композиционных сплавов на основе систем Al–SiO<sub>2</sub> и Al–SiC, полученных с использованием гетерофазных технологий / И. В. Рафальский, Б.М. Немененок, А.В. Арабей, П.Е. Лущик, А.С. Панасюгин // *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. – 2013. – Вып. 34, Ч. 1. – С. 108–119.

14. Программный комплекс для расчета объемной доли твердой фазы, выделяющейся при затвердевании литейных сплавов / И. В. Рафальский, Д.С. Морозов, П.Е. Лущик, А.В. Арабей // *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. – 2014. – Вып. 35. – С. 91–95.

15. Адаптивный контроль металлургических процессов выплавки и обработки сплавов при производстве литых изделий / И.В. Рафальский, Б.М. Немененок, Д.С. Морозов, П.Е. Лущик, А.В. Арабей // *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. – 2014. – Вып. 35. – С. 29–39

### **Материалы конференций и тезисы докладов**

16. Влияние легирующих компонентов и примесей на структуру модифицированных силуминов / И.В. Рафальский, Г.В. Довнар, П.Е. Лущик, А.В. Арабей // *Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: сборник научных трудов XI международной науч.-техн. конф., Запорожье, 19 – 22 сентября 2006 г. / ЗНТУ. – Запорожье, 2006. – С.135–137.*

17. Рафальский, И.В. Влияние примесей на структуру силуминов / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик, А.В. Бельский // *Новые материалы и технология их обработки: материалы VII Республиканской студенческой науч.-техн. конф., Минск, 25 – 27 апреля 2006 г. / БНТУ. – Минск, 2006. – С.3–7.*

18. Рафальский, И.В. Разработка статистических моделей для оценки количественных характеристик и свойств сплавов Al–Si–Fe–Mn / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // *Новые материалы и технология их обработки: материалы VIII Республиканской студенческой науч.-техн. конф., Минск, 18 – 20 апреля 2007 г. / БНТУ. – Минск, 2007. – С.18–20.*

19. Рафальский, И.В. Разработка эффективных алгоритмов решения задач оптимизации многофакторных многокомпонентных систем в металлургическом производстве / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // *Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: материалы Международной науч.-техн. конф., Жлобин, 6-7 сент. 2007г. / Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, ПО «БМЗ»; под ред. д.т.н. Д.М. Кукуя – Жлобин, 2007. – С. 64.*

20. Development of software and processing of the information in metallurgical / P. Lushchik, A. Arabey, I. Rafalski, O. Kouzoura // *International doctoral seminar. – Slovenska republika, 2007. – P. 163 – 166.*

21. Arabey, A. The automated system for the foundry processes control / A. Arabey, P. Lushchik, I. Rafalski // International doctoral seminar. – Slovenska republika, 2007. – P. 7–13.

22. Рафальский, И.В. Разработка статистических моделей для контроля качества сплавов Al–Si–Fe–Mn / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // Новые материалы и технология их обработки: материалы VIII Республиканской студенческой науч.-техн. конф., Минск, 18 – 20 апреля 2007 г. / БНТУ. – Минск, 2007. – С.16–18.

23. 3–D modeling and computer simulation of aluminum alloys solidification for a quality estimation of casting / P. Lushchik, A. Arabey, I. Rafalski, O. Kouzoura // International doctoral seminar. – Slovenska republika, 2008. – P. 68–72.

24. Рафальский, И.В. Решение тепловых задач в компьютерной системе моделирования литейных процессов ProCAST для оценки качества отливок из алюминиевых сплавов / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // Новые материалы и технология их обработки: материалы IX Республиканской науч.-техн. конф., Минск, 23 – 25 апреля 2008 г. / БНТУ. – Минск, 2008. – С.4–7.

25. The computer analysis of phase transitions in hypereutectic Al–Si alloys in view of influence of melt temperature processing / A. Arabey, I. Rafalski, O. Reut, P. Lushchik // International doctoral seminar. – Slovenska republika, 2008. – P. 9–15.

26. Rafalski, I. Computer modeling of cast alloys solidification by computer-aided cooling curve analysis (CA–CCA) / I. Rafalski, A. Arabey, P. Lushchik // International doctoral seminar. – Slovenska republika, 2009. – P. 291–301.

27. Рафальский, И.В. 3–D моделирование процесса затвердевания отливок с использованием данных о фазовых превращениях литейных сплавов / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы VII Международной науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2009. – С. 186.

28. Лущик, П.Е. Решение проблемы получения адекватных компьютерных моделей литейных процессов / П.Е. Лущик, А.В. Арабей // Наука – образованию, производству, экономике: материалы VII Международной науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2009. – С. 200.

29. Эффективные методы калибровки входных данных для систем компьютерного моделирования литейных процессов / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик, К.Л. Калошин, А.Г. Князев // Новые материалы и технология их обработки: материалы X Республиканской студенческой науч.-техн. конф., Минск, 28 – 30 апреля 2009 г. / БНТУ. – Минск, 2009. – С. 6–8.

30. Рафальский, И.В. Электронная база данных для анализа технологических факторов литейного производства, определяющих качество литейной продукции / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // Новые материалы и технология их обработки: материалы X Республиканской студенческой науч.-техн. конф., Минск, 28 – 30 апреля 2009 г. / БНТУ. – Минск, 2009. – С.11–12.

31. Рафальский, И.В. Моделирование процесса затвердевания многокомпонентных сплавов с использованием данных компьютерного



термического анализа / И.В. Рафальский, А.В. Арабей, П.Е. Лущик // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве: материалы II Международной науч.-техн. конф., 7–11 сентября 2009 г. // Под общ. ред. А.Н.Фесенко. – Краматорск: ДГМА, 2009. – С. 171–173.

32. Рафальский, И.В. Использование данных компьютерного термического анализа для моделирования процесса затвердевания сплавов / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик, А.В. Арабей // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно–штампового производств: материалы X Международной науч.-практ. конф., Барнаул, 19–20 ноября 2009 г. / АлтГТУ. – Барнаул, 2009. – С. 135–140.

33. Theoretical and experimental study of the solidification process of melts in computer aided thermal analysis (CA–CCA) / I. Rafalski, P. Lushchik, I. Shestyuk, A. Arabey, A. Chau // International doctoral seminar. – Slovenska republika, 2010. – P. 435–446.

34. Немененок, Б.М. Оптимизация процесса получения отливки «Коллектор» Минского моторного завода с использованием средств имитационного моделирования литейных процессов ProCAST / Б.М. Немененок, П.Е. Лущик, С.В. Цуканов // Новые материалы и технология их обработки: материалы XI Республиканской студенческой науч.-техн. конф., Минск, 20 – 23 апреля 2010 г. / БНТУ. – Минск, 2010. – С.27–29.

35. Рафальский, И.В. Анализ процесса затвердевания пробы расплава с использованием компьютерного термического анализа кривых охлаждения литейных сплавов / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик, И.В. Шестюк // Новые материалы и технология их обработки: материалы XI Республиканской студенческой науч.-техн. конф., Минск, 20 – 23 апреля 2010 г. / БНТУ. – Минск, 2010. – С.35–37.

36. Лущик, П.Е. Комплексное модифицирование сплавов системы алюминий–кремний с использованием алюмоматричных композиций на основе карбида кремния / П.Е. Лущик, И.В. Рафальский // Инновационное развитие и востребованность науки в современном Казахстане: материалы V международной конференции, Алматы, 24 – 25 ноября 2011 г. / под ред. Б. Г. Мухамеджанова. – Алматы, 2011. – С. 96 – 101.

37. Лущик, П.Е. Синтез литейных алюмоматричных композиционных сплавов на основе системы Al–Ti–SiC / П.Е. Лущик, И.В. Рафальский // Молодежь в науке–2012: материалы международного форума молодых ученых стран СНГ, Алматы, 17 – 18 мая 2012. / под ред. Б. Г. Мухамеджанова. – Алматы: Санат, 2012. – Ч.3. – С. 250–254.

38. Лущик, П.Е. Влияние модифицирующей обработки на теплофизические характеристики и формирование зоны усадочных дефектов в силуминах / П.Е. Лущик, И.В. Рафальский // Литье. Металлургия. 2013: материалы IX Международной науч.-практ. конф., Запорожье, 21 – 23 мая 2013 г. / Под общ. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.И. – Запорожье, 2013. – С. 117–119.

39. Рафальский, И.В. Применение программы подготовки данных для компьютерного моделирования затвердевания сплавов при прогнозировании возникновения усадочных дефектов в эвтектических силуминах / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы XI Международной науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2013– С.294.

40. Рафальский И.В. Расчет содержания твердой фазы, выделяющейся при затвердевании расплава / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // «Металлургия: технологии, инновации, качество»: труды XX Международной науч.-практ. конф., Ч.2. 15 – 16 ноября 2017 г. / под ред. Е.В. Протопопова; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2017. – С. 196–200.

41. Рафальский, И.В. Математическое моделирование процесса затвердевания и разработка технологий изготовления бездефектных отливок из алюминиевых сплавов / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик // «Литейное производство и металлургия, 2017. Беларусь»: сборник трудов 25–й Международной науч.-техн. конф., Минск, 18–19 октября / Под общ. ред. Е. И. Маруковича. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 127–133.

### **Патенты**

42. Способ получения алюминиево–кремниевых сплавов: пат. 14528 Респ. Беларусь: МПК С22С1/02 / И.В. Рафальский, А.В. Арабей, П.Е. Лущик; дата публ.: 30.06.2011.

43. Способ модифицирования сплавов: пат. 18610 Респ. Беларусь: МПК С22С1/02 / И.В. Рафальский, П.Е. Лущик, А.В. Арабей; дата публ.: 30.10.2014.

44. Способ получения композиционного материала: пат. 19815 Респ. Беларусь: МПК С22С1/02 / А.В. Арабей, И.В. Рафальский, П.Е. Лущик; дата публ.: 28.02.2016.

45. Способ получения композиционного материала на основе алюминия: пат. 20184 Респ. Беларусь: МПК С22С1/02 / А.В. Арабей, И.В. Рафальский, П.Е. Лущик, Б.М. Немененок, В.Л. Трибушевский, Л.В. Трибушевский; дата публ.: 30.06.2016.

## РЭЗІЮМЭ

**Лушчык Павел Яугеньевіч**  
**ВЫЗНАЧЭННЕ ПАРАМЕТРАЎ КІНЕТЫКІ ЗАЦВЯРДЗЕННЯ І**  
**МАДЭЛЯВАННЕ ЛІЦЕЙНЫХ ПРАЦЭСАЎ ПРЫ АТРЫМАННІ**  
**АДЛІВАК З МАДЫФІКАВАНЫХ СІЛУМІНАЎ**

**Ключавыя словы:** параметры кінетыкі зацвярдзення, мадыфікаваныя сілумыны, мадэляванне ліцейных працэсаў, двухфазная зона, атрыманне адлівак.

**Мэта даследаванняў:** вызначэнне параметраў кінетыкі зацвярдзення мадыфікаваных сплаваў сістэмы Al-Si і мадэляванне працэсаў фарміравання адлівак з іх.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** метады эксперыментальнага даследавання працэсу зацвярдзення сплаваў з выкарыстаннем камп'ютэрнага тэрмічнага аналізу; метады імітацыйнага мадэлявання ліцейных працэсаў; стандартныя метадыкі ацэнкі фізіка-механічных уласцівасцяў літых вырабаў; метады аптычнага, рэнтгенаструктурнага аналізаў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацавана метадыка вызначэння параметраў кінетыкі зацвярдзення сілумынаў з выкарыстаннем дадзеных аднатэрмапарнага тэрмічнага аналізу пробы расплаву з улікам змянення функцыянальных залежнасцяў каэфіцыента Ньютана-Рыхмана. Атрыманы новыя навукова абгрунтаваныя эксперыментальныя і тэарэтычныя вынікі даследавання, якія ўключаюць устаноўленыя залежнасці значэнняў каэфіцыента Ньютана-Рыхмана і колькасці цвёрдай фазы, якая выдзяляецца пры зацвярдзенні ад тэмпературы і часу для шырокай наменклатуры алюміній-крамянёвых сплаваў і ўсталяваныя залежнасці параметраў кінетыкі зацвярдзення мадыфікаваных сілумынаў ад часу зацвярдзення, тэмпературы і хуткасці ахладжэння сплаву, якія дазваляюць колькасна ацаніць эфекты ўплыву розных мадыфікатараў і хуткасці ахладжэння на працэс фарміравання цвёрдай фазы пры зацвярдзенні алюміній-крамянёвых сплаваў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы і аптымізацыі тэхналогій атрымання адлівак з алюміній-крамянёвых сплаваў; вынікі працы ўжаранены на ЗАТ «БелВірТел», філіял БНТУ "Навукова-даследчая частка" і ў навучальны працэс БНТУ.

**Галіна прымянення:** прамысловыя прадпрыемствы, якія займаюцца вырабам адлівак з алюмініевых сплаваў і распрацоўкай тэхналогіі атрымання бездэфектных адлівак.

## РЕЗЮМЕ

Лущик Павел Евгеньевич

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КИНЕТИКИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОТЛИВОК ИЗ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СИЛУМИНОВ

**Ключевые слова:** параметры кинетики затвердевания, модифицированные силумины, моделирование литейных процессов, двухфазная зона, получение отливок.

**Цель исследований:** определение параметров кинетики затвердевания модифицированных силуминов и моделирование процессов формирования отливок из них.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** методы экспериментального исследования процесса затвердевания сплавов с использованием компьютерного термического анализа; метод имитационного моделирования литейных процессов; стандартные методики оценки физико-механических свойств литых изделий; методы оптического, рентгеноструктурного анализов.

**Полученные результаты и их новизна:** разработана методика определения параметров кинетики затвердевания силуминов с использованием данных однотермопарного термического анализа пробы расплава с учетом изменения функциональных зависимостей коэффициента Ньютона-Рихмана. Получены новые научно обоснованные экспериментальные и теоретические результаты исследования, включающие установленные зависимости значений коэффициента Ньютона-Рихмана и содержания твердой фазы, выделяющейся при затвердевании от температуры и времени для широкой номенклатуры алюминий-кремниевых сплавов и установленные зависимости параметров кинетики затвердевания модифицированных силуминов от времени затвердевания, температуры и скорости охлаждения сплава, позволяющие количественно оценить эффекты влияния различных модификаторов и скорости охлаждения на процесс формирования твердой фазы при затвердевании алюминий-кремниевых сплавов.

**Рекомендации по использованию:** результаты исследования могут быть использованы при разработке и оптимизации технологий получения отливок из алюминий-кремниевых сплавов; результаты работы внедрены на ЗАО «БелВирТел», филиал БНТУ «Научно-исследовательская часть» и в учебный процесс БНТУ.

**Область применения:** промышленные предприятия, занимающиеся изготовлением отливок из алюминиевых сплавов и разработкой технологий получения бездефектных отливок.

## SUMMARY

Lushchyk Pavel

### DETERMINATION KINETICS PARAMETERS OF SOLIDIFICATION AND SIMULATION OF FOUNDRY PROCESS FOR CASTING OF MODIFIED SILUMINS

**Keywords:** kinetics parameters of solidification, modified silumins, simulation of casting processes, two-phase zone, production of castings.

**Purpose of research:** determination kinetics parameters of solidification of modified Al-Si alloys and modeling of formation process of castings from silumins.

**Research methods and equipment:** methods of experimental research of solidification of alloys using computer thermal analysis; method of modeling of casting processes; standard techniques for assessing the physical and mechanical properties of castings; optical methods, X-ray diffraction spectroscopy.

**The results obtained and their novelty:** new method for determining the kinetics parameters of solidification of silumins was developed using data from a single-thermocouple thermal analysis of a sample of a melt, taking into account the change in the functional dependences of the Newton-Rikhman coefficient. New scientifically grounded experimental and theoretical results of the research have been obtained, including the established dependences of the Newton-Rikhman coefficient and the solid phase that is released during solidification as a temperature and time functions for a wide range of aluminum-silicon alloys and the established dependences of the solidification kinetic parameters of the modified silumins on the solidification time, temperature and the rate of cooling of the alloy, allowing to quantify the effects of various modifiers and cooling rate on the formation of a solid phase during the solidification of aluminum-silicon alloys.

**Recommendations for using:** the results of research can be used in the development and optimization of technologies for the production of castings from aluminum-silicon alloys; results of work were used at the enterprise "BelVirTeL", at the branch of BNTU "Scientific-Research Part" and in educational process of BNTU.

**Application:** industrial enterprises engaged in casting of aluminum alloys and development of technology for producing defect-free castings.

Научное издание

**ЛУЩИК**  
**Павел Евгеньевич**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КИНЕТИКИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ  
ОТЛИВОК ИЗ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СИЛУМИНОВ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.16.04 – Литейное производство

Подписано в печать 31.08.2018. Формат 60П84  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,27. Тираж 80. Заказ 706.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.