

На правах рукописи



КОСТИН Игорь Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА
МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ СЛИТКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ 5XXX СЕРИИ**

05.16.04 – Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент **Беляев Сергей Владимирович**

Официальные оппоненты:

Батышев Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела литейных процессов Государственный научный центр Российской Федерации АО НПО «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»

Никитин Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент, декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)», г. Самара.

Защита состоится 22 июня 2018 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «____»_____2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.099.10



Татьяна Ренатовна Гильманшина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ*

Актуальность работы. Одним из перспективных проектов ОК РУСАЛ является производство крупнотоннажных плоских слитков из алюминиевых сплавов серии 5XXX, предназначенных для авиа-, ракето- и судостроения. Однако существующая технология данного производства не обеспечивает стабильного получения качественных слитков. Поэтому разработка научно-обоснованных технических и технологических решений для обеспечения требуемого уровня качества крупнотоннажных плоских слитков из алюминиевых сплавов серии 5XXX, несомненно, является актуальной научно-технической проблемой. Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнялась в рамках проекта 14.578.21.0193 «Разработка теоретических и технологических решений снижения водорода в составе алюминия и низколегированных алюминиевых сплавов» Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57816X0193, а также по договору с ОК «РУСАЛ» «Разработка технических решений по достижению мелкозернистой структуры в плоских слитках сплавов серии 5XXX.

Степень разработанности темы: Благодаря исследованиям таких известных ученых, как М.Б. Альтман, Г.Ф. Баландин, А.И. Батышев, К.А. Батышев, А.Ф. Белов, В.Д. Белов, Н.А. Белов, А.И. Беляев, А.А. Бочвар, И.Г. Бродова, А.И. Вейник, С.М. Воронов, И.Е. Горшков, Б.Б. Гуляев, В.Б. Деев, В.И. Добаткин, В.И. Елагин, В.М. Замятин, Е.Д. Захаров, В.В. Захаров, В.С. Золоторевский, В.А. Кечин, Б.А. Колачев, Г.Г. Крушенко, Б.А. Кулаков, В.А. Ливанов, Д.П. Ловцов, М.В. Мальцев, Л.И. Мамина, С.В. Махов, Л.Ф. Мондольфо, Р.К. Мысик, В.И. Напалков, Б.М. Немененок, В.И. Никитин, К.В. Никитин, И.И. Новиков, В.К. Портной, Ри Хо Сен, И.Ф. Селянин, А.Н. Соколов, А.Г. Спасский, Ю.А. Филатов, И.Н. Фридляндер, М.В. Шаров, Г.И. Эскин, Д.Г. Эскин др. разработаны научные основы плавки, кристаллизации цветных металлов и сплавов, внесен существенный вклад в дальнейшее развитие теории и технологии литейного производства, что явилось научной базой при проведении исследований в настоящей работе для обоснования и дальнейшего совершенствования технологии плавки и литья плоских слитков из алюминиевых сплавов. Однако по-прежнему задача прогнозирования размера зерна по объему слитков для алюминиевых сплавов, в том числе 5XXX серии до сих пор остается нерешенной и требует проведения дополнительных исследований в данном направлении.

Объектом исследований в работе являются алюминиевые сплавы 5XXX серии, технологические процессы и оборудование для производства крупнотоннажных плоских слитков методом полунепрерывного литья.

* Диссертация выполнена при научной консультации канд. техн. наук А.И. Безруких

Целью диссертационной работы является разработка комплекса технических и технологических решений, обеспечивающих достижение мелкозернистой структуры для плоских слитков 5XXX серии.

Для достижения данной поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- исследовать механизм образования мелкозернистой структуры при изготовлении плоских слитков из алюминиевых сплавов 5XXX серии;
- разработать методику прогнозирования структуры слитка с учетом реального химического состава сплава и применяемого модификатора;
- разработать компьютерную модель процесса модифицирования при изготовлении плоских слитков с учетом конструктивных и технологических параметров литья;
- усовершенствовать экспресс метод оценки модифицирующей способности лигатур для алюминиевых сплавов;
- проанализировать модифицирующую способность лигатур системы *Al-Ti-B* в зависимости от технологических и конструктивных параметров промышленного производства плоских слитков;
- с учетом промышленных условий предприятий ОК РУСАЛ разработать и внедрить эффективную технологию для достижения мелкозернистой структуры плоского слитка при непрерывном литье для алюминиевых сплавов 5XXX серии.

В работе получены следующие результаты, отличающиеся **научной новизной:**

1. В результате обобщения экспериментального материала, полученного непосредственно в промышленных условиях и анализа научно-технической литературы установлено, что модифицирование алюминиевых сплавов обусловлено совместным воздействием Al_3Ti и TiB_2 , а Al_3Ti является мощным инициатором зародышеобразования из-за его перитектической реакции с $\alpha-Al$ и существует, в том числе в виде покрытия на гранях TiB_2 .

2. Научно обоснованы и экспериментально подтверждены следующие закономерности при модифицировании алюминиевых сплавов серии 5XXX:

а) увеличение расхода модификатора *Al-Ti5-B1* до 2,5 кг/т приводит к измельчению размера зерна в пробах ТР-1 почти в два раза с минимальным размером зерна до 94 мкм;

б) наиболее благоприятная концентрация модифицирующих частиц лигатурного прутка наблюдается при введении в расплав лигатурного прутка марки *Al-Ti5-B1* в следующих случаях расхода и места ввода лигатурного прутка:

- 0,5 кг/т до фильтра МТФ и 2,0 кг/т во входной портал дегазатора.
- 1,0 кг/т до фильтра МТФ, 1,0 кг/т во входной портал дегазатора, 0,5 кг/т после фильтра МТФ.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Создана новая инженерная методика прогнозирования размера зерна в слитке, отлитого полунепрерывным способом, учитывающая реальные физико-химические свойства сплава и модификатора.

2. Разработаны компьютерные модели с использованием программных комплексов ANSYS Fluent и ProCAST со встроенным модулем CAFE с учетом конструктивных и технологических параметров полунепрерывного процесса литья плоского слитка, в том числе разливка расплава в кристаллизатор через распределительную коробку Combo Bag, позволяющие:

- определить форму и размеры лунки во время кристаллизации плоского слитка из сплавов 5XXX серии;

- спрогнозировать структуру плоского слитка на стационарной стадии кристаллизации полунепрерывным методом;

- вычислить распределение объемной концентрации легирующих веществ модификатора системы *Al-Ti-B* вдоль металлотракта от миксера до кристаллизатора.

3. Предложена методика оценки качества модифицирующих лигатур системы *Al-Ti-B*, применяемых в производстве слитков, которая позволит более объективно осуществлять входной контроль модификаторов и снизить количество брака по структуре плоских слитков.

4. Разработан и внедрен комплекс новых технических и технологических решений для производства плоских слитков алюминиевых сплавов 5XXX серии непрерывным методом, включающий:

- технологический регламент по производству плоских слитков серии 5XXX, позволяющий получать плоские слитки с мелкозернистой структурой и подтвержденный проведением опытных плавов на предприятии ОК РУСАЛ и актом внедрения;

- устройство для исследования модифицирующей способности лигатур (Патент на полезную модель № 166586 U1 Российская Федерация, МПК G01N 33/20);

- установка для исследования модифицирующей способности лигатур (Патент на полезную модель № 166581 U1 Российская Федерация, МПК G01N 33/20).

5. Результаты исследований внедрены в учебный процесс и используются при обучении магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия», магистерской программе 22.04.02.07 «Теория и технология литейного производства цветных металлов и сплавов» и аспирантов по специальности 05.16.04 «Литейное производство».

Реализация результатов работы.

Результаты работы внедрены на предприятиях ОК РУСАЛ.

Методология и методы исследований, используемые в настоящей работе, основаны на основных законах термодинамики, теории литья и кристаллизации, с применением современных методик и методов исследований: методов планирования эксперимента и статистического анализа данных; чис-

ленного моделирования с использованием программных комплексов ProCAST и ANSYS.

На защиту выносятся следующие положения:

а) результаты теоретических и экспериментальных исследований механизма образования мелкозернистой структуры при кристаллизации крупнотоннажных слитков из алюминиевых сплавов серии 5XXX;

б) результаты исследований влияния легирующих компонентов на формирование мелкозернистой структуры плоских слитков из алюминиевых сплавов серии 5XXX;

в) методики исследования, прогнозирования и контроля показателей структуры плоского слитка, изготовленного полунепрерывным методом;

г) результаты компьютерного моделирования процесса модифицирования при изготовлении плоских слитков с учетом конструктивных технологических параметров литья в промышленных условиях;

д) новая технология литья плоских слитков из алюминиевых сплавов серии 5XXX, гарантирующих получение мелкозернистой структуры.

Личный вклад автора заключается в планировании экспериментов, выборе методики, их выполнении в лабораторных условиях ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и проведении опытно-промышленных испытаний в производственных условиях на заводах ОК РУСАЛ, в обобщении и научном обосновании результатов и в формулировке выводов, обработки результатов экспериментов, подготовке научных статей и патентов. Настоящая работа является продолжением комплекса научно-исследовательских работ, выполняемых на кафедре «Литейное производство» Института цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ) в рамках научно-исследовательских работ с ОК РУСАЛ. Включенные в диссертацию и выносимые на защиту результаты настоящей работы представляют собой ту часть общих результатов научно-исследовательских работ по рассматриваемой проблеме, и выполнены автором с соавторами за годы совместной работы, которые получены непосредственно автором, или при его ведущем участии.

Степень достоверности научных положений и полученных результатов обоснована:

– применением научно-обоснованных методов исследований, компьютерного моделирования и обработки результатов;

– соответствием результатов исследований, полученных автором, с результатами других исследователей в этой области;

– практической реализацией полученных результатов.

Текст диссертации и автореферата проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат.РГБ».

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на V-VII Международных конгрессах «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2014-2017 гг.).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 12 печатных трудах и тезисах докладов, из них 2 из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, и в 3 патентах РФ.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.16.04 - Литейное производство (технические науки): 4) Исследование литейных технологий для их обоснования и оптимизации; 6) Разработка методов моделирования процессов модифицирования, заливки, затвердевания и охлаждения литых заготовок; 13) Исследование проблем качества литья; 15) Исследование процессов формирования свойств литейных сплавов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 152 источников, и двух приложений. Основной материал изложен на 160 страницах, включая 32 таблицы, 17 формул и 75 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, представлены научная и практическая значимости диссертационной работы.

В первой главе проведен критический анализ современного уровня развития производства и рассмотрены проблемы качества крупнотоннажных слитков из алюминиевых сплавов серии 5XXX для машиностроения.

Одним из крупнейших в мире производителем является ОК РУСАЛ, которая интенсивно наращивает объемы выпуска продукции с добавленной стоимостью (ПДС) и активно развивает инновационные направления в литейном производстве. Одним из перспективных направлений является производство плоских слитков из алюминиевых сплавов 5XXX серии для прокатного производства. Показано, что одним из главных требований, предъявляемым к крупнотоннажным плоским слиткам 5XXX серии является равномерная мелкозернистая структура по всему сечению и отсутствие дефектов в виде водородной и усадочной пористости.

Установлены главные условия достижения данных качественных характеристик такие, как температурно-скоростные условия литья и кристаллизации; конфигурация литейной линии и ее протяженность; вид и качество, применяемых лигатур; химический состав сплава и его подготовка в миксере; технологии модифицирования и внепечной обработки расплава. Стоит отметить, что в известной научно-технической литературе отсутствуют конкретные методы прогнозирования и достижения мелкозернистой структуры в плоских слитках алюминиевых сплавов 5XXX серии, что в свою очередь является поводом для проведения дополнительных исследований в данном направлении. На основании проведенного анализа поставлены цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлены разработанные и усовершенствованные методики проведения диссертационных исследований для определения таких характеристик качества слитков из алюминиевых сплавов серии 5XXX, как уровня водородной и усадочной пористости, состояния микро и макроструктуры слитков, механические и технологические свойства. Объектом исследований был промышленный алюминиевый сплав 5083, химический состав которого соответствовал требованиям ГОСТ 4784-97.

Макроструктуру образцов исследовали с применением стереоскопического микроскопа Stemi 2000-C, Carl Zeiss. При анализе макроструктуры слитков из сплава серии 5XXX выявляли параметры структуры слитка, наличие различных дефектов, протяженность корковой зоны, степени ликвации легирующих элементов, наличие окисных плен и неметаллических включений, с обязательным фиксированием их размеров, ориентации др.

Количественную оценку микроструктуры проводили методом линейного анализа в программе для обработки цифровых изображений структур AxioVizion, Carl Zeiss. При определении размеров водородной и усадочной пористости использовали автоматизированную систему анализа изображений «SIAMS Photolab». Микрошлифы изготавливали по методикам ООО «Митэла» на автоматизированных шлифовально-полировальных станках Saphir 520, Germany и расходных материалах фирмы Lam Plan, France. Для микроструктурного анализа изготавливались образцы, вырезанные из образцов в зонах с наиболее типичной кристаллической структурой.

Для определения пластических и прочностных характеристик образцов слитков серии 5XXX проводились экспериментальные исследования по прокатке опытных образцов, отобранных с различных этапов технологического процесса литья, и определялись механические свойства литых образцов из исследуемых сплавов. Исследования включали в себя испытания на растяжение литых образцов, моделирование процесса прокатки опытных образцов до стадии разрушения и определение предельной степени деформации, и механических свойств металла при испытаниях на разрыв, определение механических свойств на толщинах проката от 25 мм до 0,2 мм.

Моделирование процесса прокатки опытных образцов осуществляли на листовом прокатном стане DUO-400 с длиной бочки вала 400 мм фирмы Mario Di Maio SpA. Для исследования прочностных и пластических свойств опытных образцов применяли испытательные машины LFM40 и LFM400 (Швейцария) усилием соответственно 40 и 400 кН. По результатам средне-статистической обработки определяли временное сопротивление разрыву пределы прочности и текучести, а также относительное удлинение и сужение при разрушении.

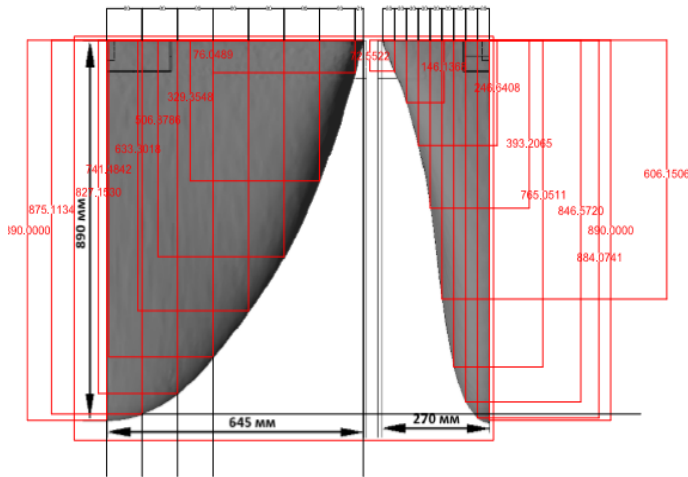


Рисунок 1- Профиль лунки в двух взаимно перпендикулярных проекциях для плоского слитка с разбивкой по вертикали на зоны

условий процесса кристаллизации данных сплавов на основе уравнения В.И. Добаткина, устанавливающего зависимость средних линейных размеров зерна от скорости охлаждения (уравнение модифицирования):

$$d_z = K_M / v_o^{n_M}, \quad (1)$$

где d_z - средний линейные размер зерна; v_o - скорость охлаждения;

K_M и n_M - эмпирические показатели, которые определяются в результате лабораторных исследований с учетом реальных физико-химических свойств сплава и модификатора.

Сначала определяются форма и размеры лунки с учетом фактических конструктивных и технологических параметров непрерывного литья слитка, и производят разбивку лунки по вертикали на зоны (рисунок 1). Далее для каждой зоны определяется скорость охлаждения v_o по следующей формуле:

$$v_o = \frac{\Delta T(z_i)}{\Delta z_i} \cdot v_L, \quad (2)$$

где $\Delta T_z = T_L - T_s$ - градиент температуры по вертикали для i -ой зоны;

Δz_i - высоты лунки в i -ой зоне; v_L - скорость литья слитка.

Следует отметить, что данная формула приемлема только для полунепрерывного литья слитков, когда на стационарной стадии процесса положение лунки относительно кристаллизатора остается постоянным. Точность определения скорости охлаждения в каждой зоне будет зависеть от достоверности определения формы и размеров лунки.

Если известны конкретные значения размеров зерна от скорости охлаждения слитка, то можно определить K_M и n_M - эмпирические показатели уравнение модифицирования (1), решая систему уравнений:

$$\begin{cases} d_{z1} = K_M / v_{o1}^{n_M} \\ d_{z2} = K_M / v_{o2}^{n_M} \end{cases} \quad (3)$$

В третьей главе представлены результаты исследований условий образования мелкозернистой однородной структуры при литье и кристаллизации плоских слитков из алюминиевых сплавов 5XXX серии, снижения водородной и усадочной пористости, а также проанализировано влияние технологических параметров данных процессов на

размер зерна.

Предложена методика прогнозирования структуры слитка реальных физико-химических

После некоторых преобразований получаем решения данной системы уравнений:

$$n_m = \frac{\ln(d_{32}/d_{31})}{\ln(v_{01}/v_{02})}; \quad K_m = d_{31}v_{01}^{n_m} = d_{32}v_{02}^{n_m} \quad (4)$$

С помощью полученного уравнения модифицирования (1) для конкретного сплава можно прогнозировать размер зерна в объеме крупногабаритного слитка, отлитого полунепрерывным способом, с учетом конструктивных и технологических параметров и реальных литейных свойств отливаемого сплава, а также оценивать модифицирующую способность различных модификаторов в условиях близких к производственным. Кроме того, уравнение модифицирования (1) позволяет решить обратную задачу – рассчитать скорость охлаждения или скорость литья для получения требуемого размера зерна:

$$v_o = \sqrt[n_m]{K_m/d_3} \quad (5)$$

Для проведения компьютерного моделирования процесса полунепрерывного литья плоского слитка применяли программный комплекс ANSYS Fluent. Для наиболее точного расчета размеров и формы лунки с учетом движения потоков расплава в лунке в модели было учтено влияние распределительной коробки (Combo-bag) с фильтрующими элементами в виде сетки, что позволило созданную модель максимально приблизить к реальному процессу литья. Результаты моделирование тепловых и гидродинамических условий полунепрерывного литья плоского слитка представлены на рис. 2, 3. Результаты моделирования размеров и формы лунки были использованы для расчета размеров зерна в разработанной методике прогнозирования структуры слитка.

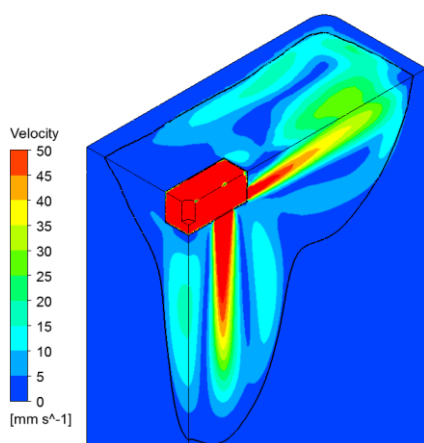


Рисунок 2 – Форма и размеры лунки плоского слитка сечением 600x1630 мм

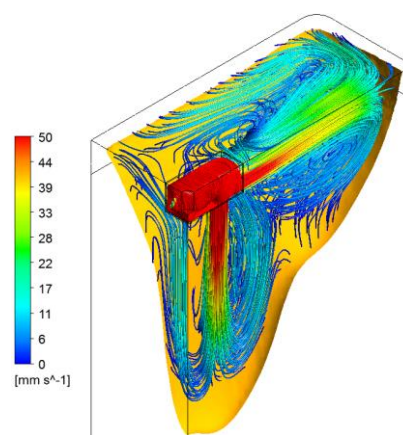


Рисунок 3 – Скорости движения металла в лунке

Для прогнозирования зеренной структуры применялось программное обеспечение ProCAST (тепловой расчет охлаждения и кристаллизации слитка) и модуль SAFE (зарождение центров кристаллизации и формирование структуры) для следующих условий полунепрерывного литья плоского слитка:

- химический состав сплава соответствовал марке 5083 по EN 485-2 2007 (зарубежный аналог сплава *AMg 4.5* по ГОСТ 4784-97);
- скорость литья 60 мм/мин;
- температуры расплава в миксере 740 ± 5 °С и в лотке перед литейным столом 700 ± 5 °С;
- размер кристаллизатора Wagstaff - 600x1630 мм;
- применяемый модификатор – *Al-Ti5-B1* с расходом 2,5 кг/т.

Количественный состав интерметаллидов в лигатуре принимался следующим: Al_3Ti (размер частиц от $3\div 132$ мкм) объемная доля составляла 8,03 %; TiB_2 (размер частиц от $3\div 5$ мкм) объемная доля - 16,92 %.

Для построения расчетной сетки модели слитка использовался сеточный построитель Visual-MESH. Стоит отметить, что в задаче была использована структурированная сетка с гексаэдрическими элементами, что позволило получить более точные результаты тепловой задачи по сравнению с традиционной тетрагональной сеткой, наиболее часто используемой в ProCAST.

Для расчета тепловой задачи была применена постановка «движущихся» граничных условий, в которой при моделировании задачи геометрия слитка остается неподвижной, а граничные условия меняются с каждым временным шагом для учета прохождения рассматриваемой части слитка через основные зоны охлаждения: движение металла через кристаллизатор; при прохождении вторичной зоны охлаждения; при погружении слитка в воду.

Структура и размер зерна, полученные по результатам моделирования представлены на рисунке 4 в сравнении с образцами опытной партии плоских слитков. Размер маркера на всех изображениях составляет 500 мкм.

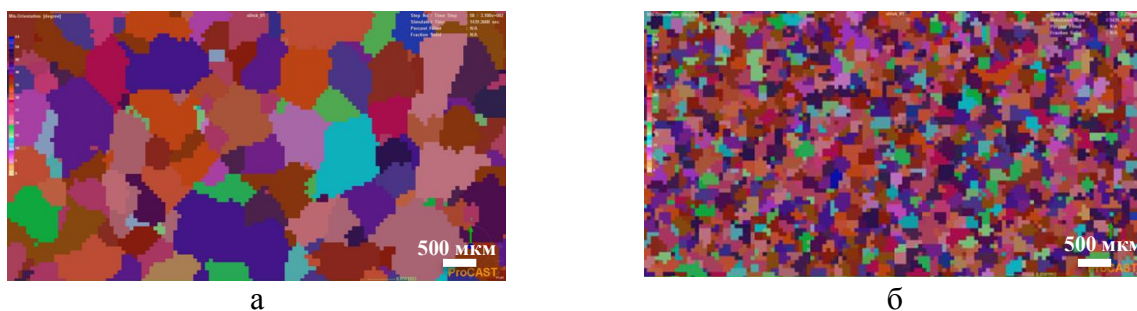


Рисунок 4 – Структура зерна в поперечном сечении слитка центр: а. - без подачи лигатуры; б. - с подачей лигатуры

В таблице 1 представлены результаты определения среднего размера зерна методами компьютерного моделирования, расчетным методом по уравнению модифицирования и металлографическим методом при измерении реальной структуры полученного слитка. Из таблицы видно, что предложенная методика дает хорошую сходимость с практикой в центре слитка, где влияние турбулентных потоков не такое сильное, как к краю. У края слитка обе методики показывают большую погрешность, что связано с влиянием турбулентных потоком движения расплава. Также результаты моделирования зеренной структуры слитков наглядно демонстрируют эффективное

измельчение зерна почти в 5 раз при подаче лигатурного прутка *Al-Ti5-B1* с расходом 2,5 кг/т.

Таблица 1 - Средний размер зерна слитка по результатам моделирования в модуле CAPE

Условия литья	Метод расчета	Средний размер зерна, мкм		
		30 мм от края слитка	150 мм от края слитка	290 мм от края слитка
Без применения лигатуры	ProCAST	322	441	511
С применением лигатуры	ProCAST	109	126	134
С применением лигатуры	Инженерная методика	79	119	130
С применением лигатуры	Металлография (реальный слиток)	90	115	129

Для исследования модифицирующей способности лигатурных прутков марок *Al-Ti5-B1*, *Al-Ti3-B1* и влияния расхода лигатуры на размер зерна отливаемых плоских слитков по усовершенствованной методике «Стандартная процедура испытаний для модификаторов алюминия Алюминиевой Ассоциации, TP-1» были проведены опытные плавки в лабораторных условиях с помощью устройства для исследования модифицирующей способности лигатур, представленного на рисунке 5.



Рисунок 5 – Общий вид устройства для исследования модифицирующей способности лигатур

Установлено, что с увеличением подачи лигатурного прутка марки KBM Affilips *Al-Ti5-B1* от 1 до 1,5 кг/т наблюдается незначительное измельчение зерна до 180 мкм, а с увеличением расхода лигатурного прутка до 2 кг/т продолжается снижение размера зерна до 141÷165 мкм. Дальнейшее увеличение подачи лигатурного прутка марки KBM Affilips *Al-Ti5-B1* до 2,5 кг/т

приводит к уменьшению зерна до 94 мкм, а затем уменьшение размера зерна практически не наблюдалось (рисунок 6).

Таким образом, в результате лабораторных исследований было установлено влияния расхода лигатуры на размер зерна и показано, что увеличение расхода модификатора от 1,0 кг/т до 2,5 кг/т приводит к измельчению размера зерна в пробах TP-1 почти в два раза для сплава 5083. Более эффективная модифицирующая способность наблюдалась при применении лигатурного прутка *Al-Ti5-B1*, по сравнению с лигатурным прутком *Al-Ti3-B1*.

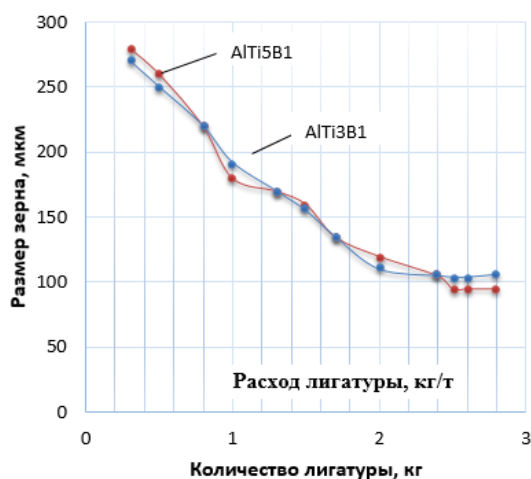


Рисунок 6 – Влияние расхода лигатуры *Al-Ti5-B1* на размер зерна: а. – изменение размера зерна от расхода лигатурного прутка для сплава 5083; б. - Макроструктура исследуемых проб x50

Компьютерное моделирование процесса модифицирования в металлотракте при полунепрерывном литье плоских слитков проводили для выбора рациональной схемы подачи лигатурного прутка, обеспечивающей наибольшее содержание и наиболее равномерное распределение объемной концентрации легирующих компонентов ($TiAl_3$ и TiB_2) в гидродинамическом потоке расплава лигатурного прутка *Al-Ti5-B1* (производства KBM Affilips) на раздаточных втулках перед входом в кристаллизатор. Скорости движение сплава 5083 в металлотракте принималось равной 0,1 м/с при температуре 727°C. Просчитывали различные варианты ввода прутков с различным расходом:

- 1) 0,5 кг/т до фильтра МТФ и 1,5 кг/т после фильтра;
- 2) 0,5 кг/т до фильтра МТФ и 0,5 кг/т после фильтра и дополнительно 1,5 кг/т во входной портал дегазатора.
- 3) 1,0 кг/т до фильтра МТФ и дополнительно 1,0 кг/т во входной портал дегазатора.
- 4) 0,5 кг/т до фильтра МТФ и 2,0 кг/т во входной портал дегазатора;
- 5) 0,5 кг/т до фильтра МТФ и 0,5 кг/т во входной портал дегазатора;

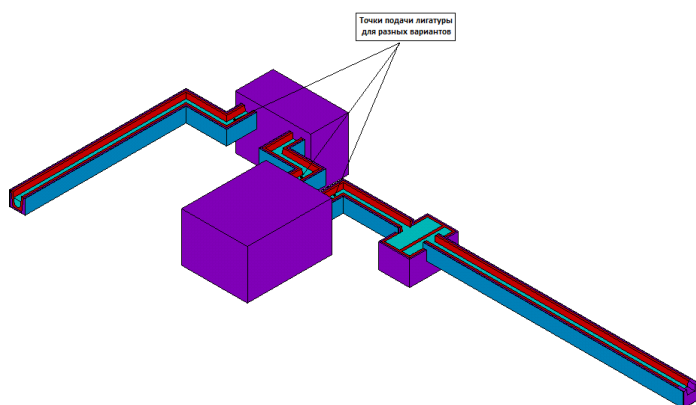


Рисунок 7 – Расчетная модель металлотракта

- 6) 0,5 кг/т до фильтра МТФ и 0,5 кг/т после, 0,5 кг/т во входной портал дегазатора;
- 7) 1,0 кг/т до фильтра МТФ, 1 кг/т во входной портал дегазатора, 0,5 кг/т после фильтра МТФ;
- 8) 1,0 кг/т до фильтра МТФ, 1,0 кг/т во входной портал дегазатора, 0,5 кг/т после фильтра МТФ.

Верификация модели была проведена по статистическим

данным измерения температуры металла на литейной линии (рисунок 8).

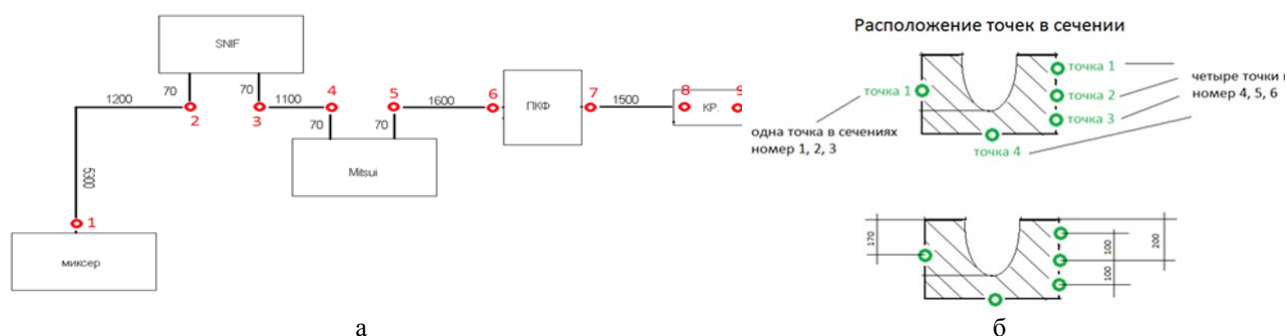


Рисунок 8 – точки измерения температуры по литейной линии:

а. - схема расположения точек замера; б. - точки замера по сечению желоба

Фильтрующие элементы из-за сложной геометрии были упрощены, однако выходное отверстие из фильтров было выполнено в соответствии с чертежами. Процентные потери лигатурного прутка вносились из статистических данных. Чем выше была величина среднеквадратичного отклонения массовой концентрации лигатуры, тем больше была величина разброса этой величины и тем, соответственно, менее равномерно она была перемешана. На рисунке 9 представлена интенсивность перемешивания расплава и проекции скорости потока металла внутри установки внепечного рафинирования.

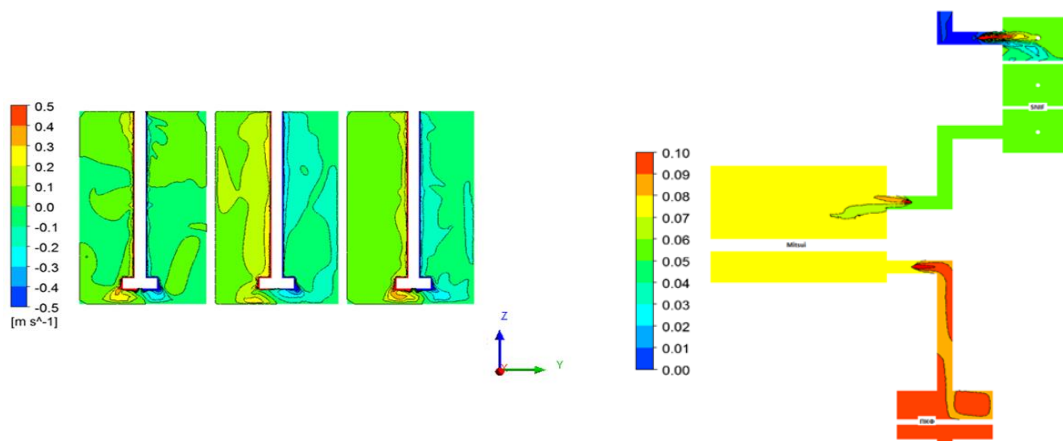


Рисунок 9 – Величина проекции скорости металла на ось X по центру установки рафинирования, м/с

Рисунок 10 - Массовый процент лигатуры в жидком алюминии при установившемся режиме течения

Установлено, что наиболее равномерное распределение объемной концентрации лигатуры на раздаточных втулках показал вариант 4 с вводом лигатурного прутка до фильтра Mitsui и во входной портал SNIF при 725 °С с массовым расходом 1,0 кг/т и 1,5 кг/т соответственно (рисунок 10)

В четвертой главе представлены новые технические и технологические решения в области производства крупнотоннажных слитков из алюминиевых сплавов. В результате анализа проведенных исследований и на основе результатов компьютерного моделирования была разработана усовершенствована технология производства плоских слитков из алюминиевых сплавов

серии 5XXX с мелкозернистой структурой для завода ОК РУСАЛ, позволяющая производить крупнотоннажные плоские слитки с мелкозернистой структурой, отсутствием дефектов в виде водородной и усадочной пористости, отвечающие всем основным мировым требованиям по качеству. На литейном агрегате алюминиевого завода были проведены промышленные испытания.

В качестве распределителей металла использовались термоформованные распределители Combo-bag с глухим дном, имеющие по три отверстия в боковых и донной частях. Рафинирование расплава при литье слитков производилось с применением установки SNIF; предварительная фильтрация производилась через трубчатый металлофильтр Mitsui, а окончательная - через пенокерамический фильтр (ПКФ) с пористостью 50 ppi. Места подачи лигатурного прутка, расход и температурный режим были выбраны в соответствии с полученными ранее результатами исследований. Эффективность модифицирования анализировали по методике Alcan-Test (TP-1) с использованием устройства, представленного на рисунке 5, а также металлографическим методом анализа темплетов, отобранных от слитков.

Параметры литья плоских слитков сечением 600x1630 мм из сплавов серии 5XXX с использованием литейной оснастки «Wagstaff» представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры литья плоских слитков сечением 600x1630 мм из сплавов серии 5XXX с использованием литейной оснастки «Wagstaff»

Температура металла в миксере, °С	Скорость литья		Расход воды		Уровень металла в кристаллизаторе		Лигатура AlTi5B1
	длина, мм	скорость, мм/мин	длина, мм	расход, м ³ /час	длина, мм	уровень, мм	расход, кг/т
740 +/- 10	пуск	35	пуск	45	пуск	45	2,5
	50	35	75	45	50	80	
	328	60	350	247	136	88	
	-	-	-	-	555	46	

Опытная партия крупнотоннажных слитков из алюминиевых сплавов серии 5XXX, отлитой по усовершенствованной технологии и разработанной нормативно-технологической документации в литейном отделении предприятия ОК РУСАЛ полностью соответствовала требованиям действующих спецификаций, а качество изготовленных слитков полностью удовлетворяло зарубежных заказчиков по мелкозернистому строению и размерам водородной и усадочной пористости.

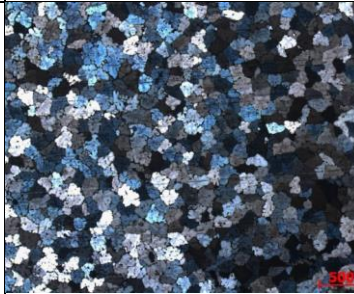
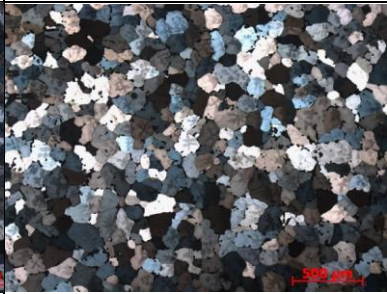
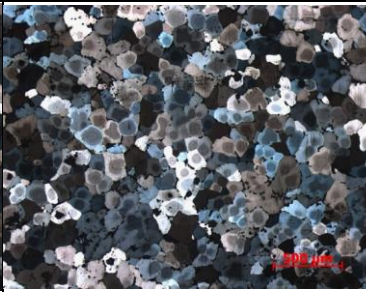
В ходе анализа химический состав сплава соответствовал требованиям спецификации. Ликвации компонентов по сечению слитка не выявлено. Содержание водорода находилось в пределах требований спецификации, на уровне не более 0,10 см³/100 г. Содержание неметаллических включений в пробах Podfa и LimCA не превысило требований, указанных в спецификации.

Параметры геометрии слитков, полученных в ходе работы, соответствовали допускам, принятым для оценки геометрии плоских слитков.

Характерная для 5XXX серии, микроструктура сплава 5083 представлена зернами α -твердого раствора и избыточными фазами эвтектического происхождения β (Al_8Mg_5), $(Fe,Mn)Al_6$, Mg_2Si , $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$.

Микроструктура, полученная в ходе эксперимента, приведена в таблице 3. Размеры частиц избыточных фаз изменяются в соответствии с размерами дендритных ячеек и сохранением характерных для сплавов 5XXX серии включений форм.

Таблица 3 - Микроструктура и размер зерна оксидированных образцов тепловых сплавов сплава 5083

Сплав	образец 1 (30 мм от края по ширине слитка)	Образец 2 (1/4)(150 мм от края по толщине слитка)	Образец 3 (центр) (290мм от края по тол- щине слитка)
5083			
ср. раз- мер, мкм	90±4	115±15	129±6

Металлографический анализ показал, что в структуре слитков сплава 5083 присутствует определенное количество интерметаллидных фаз пластинчатой формы, которые образуют скопления по границам дендритных ячеек.

Скопления неравномерно распределены по сечению образцов; что связано с присутствием в сплаве хрома и соответствует стехиометрическому составу $(Fe,Cr)_3SiAl_4$. Также типично для алюминиевых сплавов структура слитков содержит участки с тонкими нитевидными включениями оксидов Al_2O_3 . Протяженность плен оксидов определяется параметрами дендритных ячеек. В структуре образцов обнаружены протяженные участки междендритной пористости, расположенные по границам зерен. Длина участков с междендритной пористостью находится в интервале 40÷70 мкм. Отдельные участки пористости достигают размеров 120 мкм. Междендритная пористость стандартно наиболее часто встречается в центре слитка.

Микроструктура с элементами междендритной пористости представлена на рисунке 11. Водородная пористость в исследуемых слитках не выявлена.

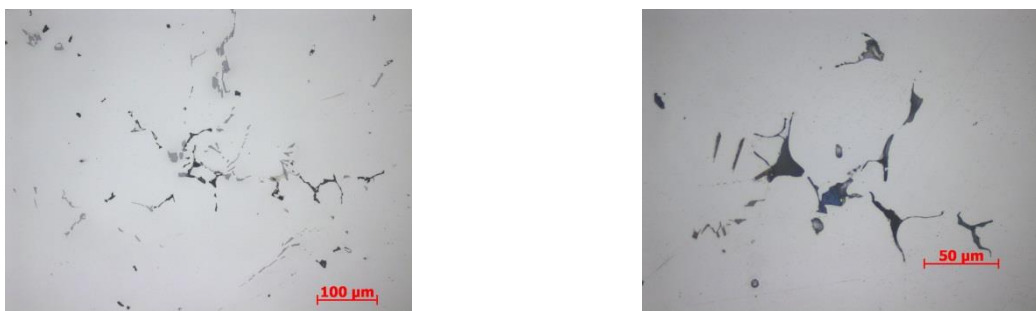


Рисунок 11 - Микроструктура образцов с микропористостью сплав 5083

Исследования механических характеристик показали, что предел текучести для сплава 5083 составил $130 \div 140$ МПа, а временное сопротивление разрыву - $240 \div 260$ МПа, относительное удлинение - $28 \div 30$ %. Твердость исследуемых образцов темплетов 5083 составила в центре $64 \div 69$ НВ, на расстоянии $\frac{1}{4}$ слитка - 67 НВ; на периферии значения твердости была равна $74 \div 75$ НВ, что объясняется наличием ликвационной зоны, обогащенной магнием в периферии. Поэтому технология модифицирования и введения лигатурного прутка при литье слитков оказала значительное влияние на размер зерна.

При исследовании модифицирующей способности лигатур, используемых в производстве алюминиевых сплавов в промышленных условиях очень важно оперативно получать достоверную информацию о результатах процесса модифицирования. Для этого было разработано новое техническое устройство - установка для исследования модифицирующей способности лигатур, которое в отличие от известного ТР-1 обладает рядом преимуществ для повышения точности при исследовании и анализе модифицирующей способности лигатур. Созданная установка (патент на полезную модель № 166581) использовалась во время проведения исследований в настоящей работе и зарекомендовала себя только с положительной стороны.

В **заключении** представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате проведенных диссертационных исследований в настоящей работе решена актуальная научно-техническая проблема, направленная на повышение качества плоских слитков из алюминиевых сплавов 5XXX серии, при этом получены следующие основные результаты:

1. На основе обобщения экспериментального материала и анализа научно-технической литературы установлено, что модифицирование алюминиевых сплавов обусловлено совместным воздействием Al_3Ti и TiB_2 , а Al_3Ti является мощным инициатором зародышеобразования из-за его перитектической реакции с $\alpha-Al$ и существует, в том числе в виде покрытия на гранях TiB_2 .
2. Создана новая инженерная методика прогнозирования размера зерна в слитке, отлитого полунепрерывным способом, учитывающая реальные физико-химические свойства сплава и модификатора.

3. Разработаны компьютерные модели с использованием программных комплексов ANSYS Fluent и ProCAST со встроенным модулем CAFE с учетом конструктивных и технологических параметров непрерывного процесса литья плоского слитка, в том числе разливка расплава в кристаллизатор через распределительную коробку Combo Bag, позволяющие:

- определить форму и размеры лунки во время кристаллизации плоского слитка из сплавов 5XXX серии;
- спрогнозировать структуру плоского слитка на стационарной стадии кристаллизации полунепрерывным методом;
- вычислить распределение объемной концентрации легирующих веществ модификатора системы *Al-Ti5-B1* вдоль металлотракта от миксера до кристаллизатора.

4. В результате компьютерного моделирования установлено и подтверждено на практике:

- наиболее благоприятная концентрация модифицирующих частиц лигатурного прутка наблюдается при введении в расплав лигатурного прутка марки *Al-Ti5-B1* в следующих случаях расхода и места ввода лигатурного прутка:
- 0,5 кг/т до фильтра МТФ и 2,0 кг/т во входной портал дегазатора.
- 1,0 кг/т до фильтра МТФ, 1,0 кг/т во входной портал дегазатора, 0,5 кг/т после фильтра МТФ.

5. В результате проведения лабораторных исследований установлено, что для сплава 5083 увеличение расхода модификатора *Al-Ti5-B1* от 1 кг/т до 2,5 кг/т приводит к измельчению размера зерна в пробах TP-1 почти в два раза с минимальным размером зерна 94 мкм.

6. Создана методика оценки качества модифицирующих лигатур системы *Al-Ti-B*, применяемых в производстве слитков, которая позволит более объективно осуществлять входной контроль модификаторов и снизить количество брака по структуре плоских слитков.

7. Разработан и внедрен комплекс новых технических и технологических решений для производства плоских слитков алюминиевых сплавов 5XXX серии полунепрерывным методом, включающий:

- технологический регламент по производству плоских слитков серии 5XXX, позволяющий получать плоские слитки с мелкозернистой структурой и подтвержденный проведением опытных плавок на предприятии ОК РУСАЛ и актом внедрения;
- устройство для исследования модифицирующей способности лигатур (Патент на полезную модель №166586 U1 Российская Федерация, МПК G01N 33/20);
- установка для исследования модифицирующей способности лигатур (Патент на полезную модель № 166581 U1 Российская Федерация, МПК G01N 33/20).

8. Результаты исследований внедрены в учебный процесс и используются при обучении магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и маги-

стерской программе 22.04.02.07 «Теория и технология литейного производства цветных металлов и сплавов» и аспирантов по специальности 05.16.04 «Литейное производство».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. **Костин И.В.** Исследование технологии модифицирования при литье плоских слитков 5XXX серии / И.В. Костин, А.И. Безруких, С.В. Беляев [и др.] // Журнал Сибирского Федерального университета. Химия. – 2017. - №1. – С. 90-98. **(рекомендуемое из перечня ВАК).**
2. Фролов В.Ф. О модифицировании слитков из Al-сплавов серии 1XXX / В.Ф. Фролов, В.Б. Деев, С.В. Беляев, **И.В. Костин** [и др.] // Metallurgy машиностроения. - 2016. - № 4. - С. 35-37. **(рекомендуемое из перечня ВАК).**
3. Беляев С.В. Исследование процесса образования мелкозернистой структуры в плоских слитках из алюминиевых сплавов серии 5XXX / С.В. Беляев, А.И. Безруких, **И.В. Костин** [и др.] // Сборник докладов VII Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». – Красноярск, 2015. - С. 1099-1100.
4. Ильин А.А. Применение математического моделирования для расчета распределения лигатурной составляющей в литейном желобе и при разработке технологии непрерывного литья плоских слитков / А.А. Ильин, **И.В. Костин**, Я.А. Третьяков [и др.] // Сборник докладов VII Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». – Красноярск, 2015. - С. 1101-1105.
5. **Костин И.В.** Исследование технологичности обработки и свойств металла сплавов алюминия серии 1XXX / И.В. Костин, Н.Н. Довженко, С.В. Беляев, В.Ф. Фролов [и др.] // Сборник докладов VII Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». – Красноярск, 2015. - С. 1254-1255.
6. **Костин И.В.** Устройство для исследования модифицирующей способности лигатур для алюминиевых сплавов. / И.В. Костин // Сборник материалов международной конференции «Перспектив свободный 2015». - Красноярск, 2015. - С. 32-36.
7. Мамина Л.И. Модифицирование алюминия технической чистоты комплексом наноструктурированных компонентов. / Л.И. Мамина, А.И. Безруких, **И.В. Костин**, [и др.] // Труды XI-го съезда литейщиков России. -2013. - С. 121-125.
8. **Костин И.В.** Моделирование процесса распределения лигатуры *Al-Ti-B* в зависимости от расхода и схемы ввода прутка при литье плоских слитков / И.В. Костин, А.А. Ильин, С.В. Беляев // Сборник материалов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив Свободный - 2016». – Красноярск, 2016. - С. 26-31.
9. Безруких А.И. Исследование модифицирующей способности опытной лигатуры *Al-Ti-B-C* в сравнении с *Al-Ti-B* / А.И. Безруких, С.В. Беляев, **И.В. Ко-**

стин [и др.]// Сборник материалов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив Свободный - 2016». – Красноярск, 2016. - С. 19-23.

10. Патент на полезную модель №166586 U1 Российская Федерация, МПК G01N 33/20 - №2015151286/15. Устройство для исследования модифицирующей способности лигатур / **И.В. Костин**, В.Ф. Фролов, Беляев С.В. [и др.]; заявл. 30.11.2015; опубл. 10.12.2016 Бюл. № 34.

11. Патент на полезную модель № 155319 U1 Российская Федерация, МПК B22D 11/06 - № 2015107359/02. Устройство для непрерывного литья и пресования методом конформ / С.В. Беляев, Ю.В. Горохов, **И.В. Костин** [и др.]; заявл. 03.03.2015; опубл. 27.09.2015 Бюл. № 27.

12. Патент на полезную модель № 166581 U1 Российская Федерация, МПК G01N 33/22 - № 2016114575/15. Установка для исследования модифицирующей способности лигатур / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, С.В. Беляев, **И.В. Костин** [и др.]; заявл. 14.04.2016; опубл. 10.12.2016 Бюл. № 34.

Подписано в печать ____ . ____ . 2018. Печать плоская. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тир 100 экз. Заказ _____

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел./факс: 8(391)206-26-67, 206-26-49
E-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>