На правах рукописи

ФРОЛОВ Виктор Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЛОСКИХ СЛИТКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 1ХХХ СЕРИИ ДЛЯ ФОЛЬГОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2016

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

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

Официальные оппоненты:

Напалков Виктор Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Общество с ограниченной ответственностью «Интермикс Мет», заместитель генерального директора.

Никитин Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», факультет машиностроения, металлургии и транспорта, декан.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет)» (г. Самара).

Защита состоится 03 ноября 2016 г. в 14.00 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 и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Адрес сайта: http://www.sfu-kras.ru/.

Автореферат разослан 28 сентября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.099.10 Гильманшина Татьяна Ренатовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время развитие научно-технического прогресса в алюминиевом производстве происходит в условиях жесткой конкурентной борьбы на мировом рынке, основными требованиями которого является неуклонное повышение эффективности производства конечной продукции. В условиях действующего кризиса в металлургии в последнее время главным вектором развития алюминиевой отрасли стала тенденция увеличения в общей структуре производства металлопродукции высокого уровня обработки. В результате этого самой востребованной на мировом рынке потребления алюминия являются алюминиевые сплавы, позволяющие создавать изделия (слитки, прокат, профили, упаковочные материалы), свойства которых полностью отвечают запросам конечного потребителя. Лидер Российской алюминиевой отрасли ОК РУСАЛ (UC RUSAL) активно развивает литейное производство и планирует довести долю сплавов до 75% в общем объеме выпуска металлопродукции.

Степень разработанности темы. Одним из перспективных проектов ОК РУСАЛ является производство плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии для фольгопрокатного производства. Однако существующие технологии данного производства не обеспечивают стабильного получения качественных характеристик по внутреннему строению этих слитков. Поэтому разработка научно-обоснованных технических и технологических решений для обеспечения требуемого уровня качества плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии для фольгопрокатного производства, несомненно, является актуальной научно-технической проблемой. Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнялась в рамках Федеральной программы «Стратегия развития цветной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года», разработанной в соответствии с поручением Правительства Российской Федерации от 16 июля 2013 г. № ДМ-П9-53пр.

Объектом исследований в работе являются алюминиевые сплавы 1XXX серии, технологические процессы и оборудование для производства плоских слитков из алюминиевых сплавов 1050, 1100, 1200, 8079, 8011.

Целью диссертационной работы является разработка комплекса новых технических и технологических решений, обеспечивающих повышение качества плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии для фольгопрокатного производства.

Для достижения данной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

– исследование механизма возникновения на макроструктуре плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии дефектов вида «fir tree» или «елочная» структура (FTS), «веерная» структура (BC) и плавающих кристаллов структуры (ПКС);

– изучение комплексного влияния легирующих компонентов и приме-

сей в составе алюминиевых сплавов 1XXX серии на качество слитков;

– анализ влияния теплофизических параметров плавки, литья и кристаллизации на образование дефектов макроструктуры плоских слитков сплавов 1XXX серии;

– создание компьютерной модели растворения лигатурного прутка AlTi5B1 в системе литейных желобов и распределения интерметаллидов при модифицировании алюминиевого сплава 1XXX серии;

– разработка комплекса новых технических и технологических решений, обеспечивающих повышение эффективности литья слитков из алюминиевых сплавов.

Научная новизна.

1. На основе обобщения экспериментального материала, полученного непосредственно в промышленных условиях, были установлены следующие закономерности для возникновения дефекта FTS:

– при соотношения концентраций содержания железа и кремния $1,5 < Fe/Si < 3,5$;

– при скорости охлаждения во время кристаллизации менее 0,5 °C/с образуется дефект «fir tree» структуры на основе фаз Al_3Fe и Al_6Fe;

– при скорости охлаждения во время кристаллизации более 15÷20 °C/с формируется дефект «fir tree» структуры, состоящий из фаз Al_6Fe и Al_mFe;

– при содержании примесей с концентрацией более: Ni – 50÷70 ppm; Mg – 50÷70 ppm; V – 250 ppm; Ca – 5 ppm; Cr – 50÷70 ppm (где 1 ppm = 0,0001%); TiB_2 – 0,03%.

2. Металлографическими исследованиями установлено, что появление дефектов в виде ПКС, ВС и FTS при кристаллизации слитков сплавов 1XXX серии связано с условиями образования метастабильных Al_6Fe, Al_mFe и стабильной Al_3Fe фаз, для исключения которых предложены рациональные технологические и температурно-скоростные режимы литья плоских слитков сплавов 1XXX серии, гарантирующие отсутствие этих дефектов: содержание Ti в миксере 0,01%; температура металла в миксере 740 ±5 °C; температура металла в раздаточном жёлобе 700÷710 °C; расход лигатуры AlTi5B1 2 кг/т; скорость литья 60÷65 мм/мин; уровень металла в кристаллизаторе 50 мм; расход воды выше обычного значения на 7÷10%; температура воды 15÷25 °C.

3. Установлено, что микроструктура металла в зоне с плавающими кристаллами не имеет существенных отличий от характерной микроструктуры слитков, а образование плавающих кристаллов не связано с наличием интерметаллидов присутствующих в модифицирующем лигатурном прутке, что позволило установить диапазон требуемой температуры металла в раздаточном желобе 700÷710 °C.

Практическая значимость.

1. Разработана методика обнаружения дефектов в виде FTS, ВС и ПКС у плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии в промышленных и

лабораторных условиях.

2. На всех стадиях технологии изготовления плоских слитков опробован способ модифицирования прутковой лигатурой AlTi5B1 производства KBM Affilips, что дало возможность получить в промышленных условиях размер зерна 100÷130 мкм, что позволяет исключить дефекты при производстве фольги.

3. Создана компьютерная модель процесса плавления лигатурного прутка AlTi5B1 в системе литейных желобов и распределения интерметаллидов при модифицировании алюминиевого сплава 1XXX серии на литейной машине, учитывающая конструктивные и технологические параметры процесса промышленного производства плоских слитков для фольгопрокатного производства.

4. Разработан комплекс новых технических и технологических решений, включающий технологический регламент по производству плоских слитков 1XXX серии для предприятий ОК РУСАЛ, позволяющий исключить образование дефектов в виде FTS, BC и ПКС и устройства для производства лигатурного прутка и определения модифицирующей способности лигатур.

5. Результаты исследований внедрены в производство и учебный процесс при подготовке 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 апробированы и 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; численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований механизма образования дефектов в виде FTS, BC и ПКС при кристаллизации плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии.

2. Металлографические исследования по влиянию содержания и соотношения легирующих компонентов Fe, Si, Mn, Ti, Cr на формирования дефектов макроструктуры плоских слитков сплавов 1XXX серии.

3. Методика исследования и контроля показателей качества процессов плавки и литья плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии в лабораторных и промышленных условиях.

4. Результаты компьютерного моделирования процесса растворения лигатурного прутка AlTi5B1 в системе литейных желобов и распределения интерметаллидов при модифицировании алюминиевого сплава 1XXX серии

на литейной машине.

5. Технология плавления и литья плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии, гарантирующих отсутствие дефектов в виде FTS, BC и ПКС.

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 (г. Саяногорск, г. Красноярск), в обобщении и научном обосновании результатов и в формулировке выводов. Настоящая работа является продолжением комплекса научно-исследовательских работ, выполняемых на кафедре «Литейное производство» Института цветных металлов и материаловедения СФУ в рамках научно-исследовательских работ с ООО «РУСАЛ ИТЦ». 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 или непосредственно автором или при его ведущем участии.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов, разработанных методик и технологий основана на использовании современных методов исследований алюминиевых сплавов, математического моделирования и статистической обработки результатов, результатами статистических методов опытно-промышленных исследований, внедрением и патентами.

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

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на VI и VII Международных конгрессах «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2014-2015 гг.).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 10 печатных трудах и тезисах докладов, из них 2 из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, и в 2 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):

– исследование литейных технологий для их обоснования и оптимизации;
– разработка методов моделирования процессов модифицирования, заливки, затвердевания и охлаждения литых заготовок;
– исследование проблем качества литья;
– исследование процессов формирования свойств литейных сплавов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы, содержащего 101 источник, и 4 приложения. Основной материал изложен на 206 страницах, включая 31 таблицу и 69 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, представлены научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современных тенденций развития производства и рассмотрены проблемы качества плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии для фольгопрокатного производства.

Благодаря исследованиям отечественных и зарубежных ученых таких, как М. Б. Альтман, В. А. Андерсон, В. Г. Бабкин, Г. Ф. Баландин, А. И. Батышев, К. А. Батышев, А. Ф. Белов, В. Д. Белов, Н. А. Белов, А. И. Беляев, В. С. Биронт, 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, М. Ф. Никитина, И. И. Новиков, В. К. Портной, Ри Хосен, И. Ф. Селянин, А. Н. Соколов, А. Г. Спасский, Ю. А. Филатов, И. Н. Фридляндер, М. В. Шаров, Г. И. Эскин Д. Г. Эскин и 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 1XXX серии.

В настоящее время одним из мировых лидеров в алюминиевой отрасли является Российская компания ОК РУСАЛ (UC RUSAL), которая, несмотря на мировой кризис в алюминиевой промышленности, наращивает объемы поставок на экспорт плоских слитков сплавов 1XXX серии для фольгопрокатного производства. Одной из наиболее эффективных технологий, реализованных на заводах ОК РУСАЛ для производства плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии, является полунепрерывное литье в кристаллизатор с двухуровневым охлаждением на оборудовании Epsilon™ – Wagstaff. Показано, что основными дефектами макроструктуры плоских слитков сплавов 1XXX серии, отрицательно влияющими на производство и качество готовых изделий, являются FTS, BC и ПКС. Установлены главные причины образования выше указанных дефектов, как химический состав сплава, наличие и количество определенных примесей, температурно-

скоростные условия литья и кристаллизации, высота кристаллизатора и распределение в нем жидкого металла, вид модификатора и технология модифицирования. Однако в известной научно-технической литературе отсутствуют конкретные методы борьбы с дефектами макроструктуры плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии, что требует проведение дополнительных исследований в данном направлении. На основании проведенного анализа поставлены цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе приведена методика проведения исследований и определения показателей качества слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии. Объектом исследований были промышленные алюминиевые сплавы 1050, 1100 и 1200. Химический состав всех сплавов соответствовал требованиям ГОСТ 4784-97.

В процессе выполнения настоящей работы эксперименты проводили, как в лабораторных, так и в промышленных условиях.

Опытные плавки сплава 1XXX серии проводилась в литейном отделении на миксерах и литейной машине действующего производства. Одновременно отливалось три слитка размером 600×1750×4700 мм общей массой 45 тонн. Приготовление и литье сплавов производилось с обязательным применением дегазационных установок SNIF; фильтрация производилась через трубчатый металлофильтр PTF (Mitsui) и пенокерамический фильтр ПКФ. Отливка слитков осуществлялась через распределитель металла Combo-Bag, модифицирование производилось прутковой лигатурой Al-Ti-B после выходного портала PTF (Mitsui) из расчета 1÷2 кг/т. В процессе приготовления расплава производился отбор проб для анализа химического состава сплава, содержание водорода, макро- и микроструктуры, содержание неметаллических включений (метод PoDFa) в следующих местах: из миксера до рафинирования; из миксера после рафинирования; из желоба до SNIF; из желоба на литейном столе после ПКФ; из желоба после подачи прутка (2,5 м); из желоба после SNIF; из желоба после металлофильтра PTF (Mitsui).

Макроструктуру образцов изучали с применением стереоскопического микроскопа Stemi 2000-C, Carl Zeiss. По макроструктуре методом секущих определялся размер зерна, при этом расчете не учитывалась зона столбчатых кристаллов. При количественном анализе макроструктуры слитков из сплава 1XXX серии выявляли внутренние и поверхностные дефекты, наличие оксидных пленок и неметаллических включений, фиксируя их размеры, расположение и др.

Микроструктурный анализ проводили на микроскопе Axio Obserber A1m, Carl Zeiss. Микрошлифы изготавливали по методикам ООО «Митэла» на автоматизированных шлифовально-полировальных станках Saphir 520, Germany и расходных материалах фирмы Lam Plan, France. Для микроструктурного анализа слитков 1XXX серии изготавливались образцы, вырезанные из образцов в зонах с наиболее типичной кристаллической структурой.

Для определения деформируемости, а также пластических и прочност-

ных характеристик слитков 1XXX серии 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 три основных этапа:

– испытания на растяжение литых образцов из представленных заготовок;

– моделирование процесса прокатки опытных образцов до стадии разрушения и определение предельной степени деформации, соответствующей этой стадии и механических свойств металла при испытаниях на разрыв;

– определение механических свойств на различных толщинах проката от 25 мм до 0,1 мм.

Моделирование процесса прокатки опытных образцов осуществляли на прокатном стане ДУО с длиной бочки валка 400 мм фирмы Марио ди Майо. Для исследования прочностных и пластических свойств опытных образцов применяли испытательные машины LFM40 и LFM400 (Швейцария) усилием соответственно 40 и 400 кН. По результатам среднестатистической обработки определяли временное сопротивление разрыву (предел прочности), предел текучести при степени деформации 0,2%, а также удлинение и сужение при разрушении. Уровень механических характеристик слитков из исследуемых сплавов экспериментальных плавок достаточно высок и позволяет получать из них деформируемые полуфабрикаты с суммарными степенями деформации до 100% без разрушения и применения операций отжига.

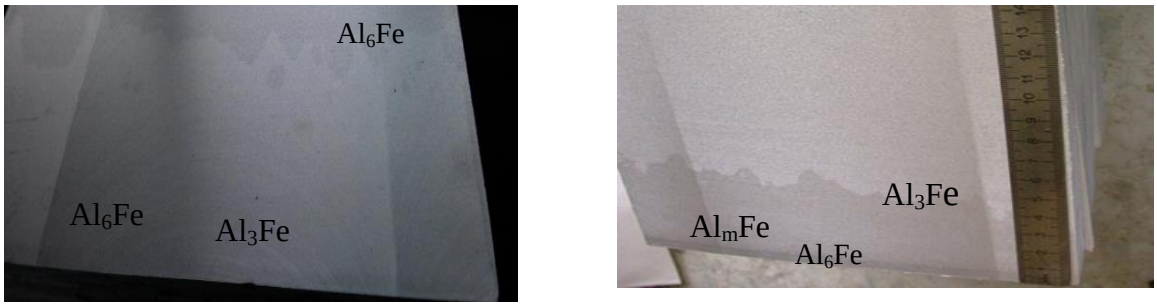
В третьей главе представлены результаты исследований влияния технологических параметров процесса литья плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии на качество продукции.

Алюминиевые сплавы 1XXX серии являются, как правило, тройными сплавами системы Al-Fe-Si, в которой образуются следующие тройные интерметаллические соединения α (Al-Fe-Si), β (Al-Fe-Si) и δ (Al-Fe-Si). Алюминиевые сплавы, применяемые в промышленности, содержат обычно две фазовые составляющие: Al+Si и Al+α (Al-Fe-Si), а фазы Al+β (Al-Fe-Si) и Al-Al_3Fe очень редко присутствуют вместе с первыми фазами. В литом алюминии во время кристаллизации могут образовываться, как равновесные стабильные фазы Al_3Fe, Fe_3SiAl_{12} или $Fe_2Si_2Al_9$, так и некоторые метастабильные неравновесные фазы, например, Al_6Fe, Al_mFe.

Вследствие этого на поверхности среза (после скальпирования) без какой-либо обработки или травления может быть обнаружена FTS в виде двух цветовых зон: тёмная зона внутри, и светлая – за её пределами. Но при травлении гидроксидом натрия (NaOH) или анодировании дефект FTS можно легко увидеть благодаря тому, что разные компоненты металлического соединения (Al-Fe) по-разному реагируют на щелочное или кислотное травление. Распознавание различных фаз структуры в разных областях слитков основано на различной растворимости фаз Al_6Fe, Al_3Fe и Al_mFe в серной кислоте. При травлении образца фаза Al_6Fe не разрушается (не растворяется в сер-

ной кислоте), образец дает темно-серый цвет. Фазы Al_3Fe и Al_mFe растворяются в серной кислоте, разрушаются и дают светло серый цвет.

Поэтому образование FTS объясняется различиями между интерметаллическими Al-Fe соединениями, кристаллизующимися на поверхности и в центре слитка, и отмечается двумя видами дефекта FTS, образованных двумя комбинациями железосодержащих фаз: Al_6Fe, Al_3Fe и Al_mFe (рис. 1).



а б

Рисунок 1 – Расположения фаз по областям структуры FTS: а – Al_6Fe; б – Al_3Fe и Al_mFe

На основе обобщения экспериментального материала, полученного непосредственно в промышленных условиях, были определены области возникновения дефекта структуры плоских слитков сплавов 1XXX серии в зависимости от соотношения концентраций содержания железа и кремния. При 1,5 < Fe/Si < 3,5 с высокой вероятностью происходит появление дефекта структуры в виде FTS (рис. 2).

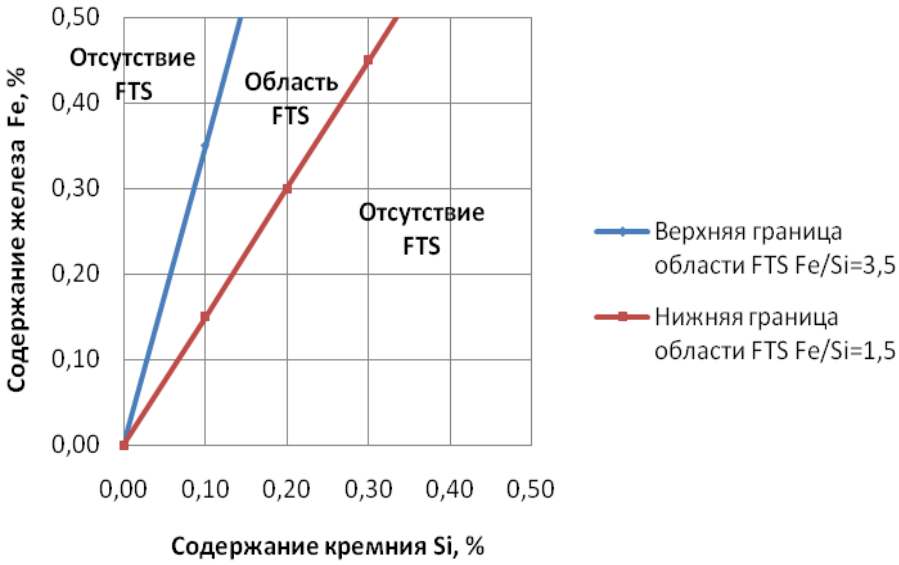


Рисунок 2 – Влияние концентраций железа и кремния на возникновение дефекта FTS

При соотношении Fe/Si < 1,5 в малолегированных сплавах системы Al-Fe-Si наиболее часто встречающейся является равновесная стабильная тройная фаза Fe_2SiAl_8. При соотношении содержания железа и кремния 1:1,0÷1,5 кристаллизация заканчивается на перитектической горизонтали.

С дальнейшим повышением содержания кремния резко возрастает интервал кристаллизации, затем в структуре появляется свободный кремний. В условиях быстрого охлаждения это будет достигнуто непосредственно

вблизи перитектической горизонтали.

Процесс кристаллизации на этой стадии аналогичен процессу кристаллизации алюминия высокой чистоты с небольшим количеством кремния. Все это исключает появления дефекта структуры в виде FTS.

Установлено, что с увеличением содержания железа и кремния при соотношении 3,5 наблюдается более мелкое зерно за счет образования устойчивых по химическому составу интерметаллидных соединений и образования эвтектик Al-Si особенно в условиях интенсивного охлаждения слитка во время кристаллизации.

При Fe/Si < 1,5 размер дендритной ячейки укрупняется в среднем почти в 2 раза. При уменьшении соотношения железа и кремния одновременно повышается неоднородность структуры и изменяется характер распределения избыточных фаз кристаллизационного происхождения.

На появление дефекта структуры в виде FTS в слитках сплавов 1XXX серии оказывает содержание примесей, имеющих концентрацию более: Ni – 50÷70 ppm; Mg – 50÷70 ppm; V – 250 ppm; Ca – 5 ppm; Cr – 50÷70 ppm (где 1 ppm=0,0001 %); TiB_2 – 0,03 %. Если алюминиевый сплав содержит указанные выше химические элементы, то граница образования фаз Al_6Fe и Al_3Fe поднимается вверх, в результате чего ёлочная структура легко образуется в плоских слитках сплавов 1XXX серии. Поэтому необходимо проводить мероприятия на уменьшение содержания данных примесей, чтобы минимизировать риск образования дефекта структуры в виде FTS.

На основе обобщения экспериментального материала, полученного непосредственно в промышленных условиях, было установлено, что при скорости охлаждения во время кристаллизации менее 0,5 °C/c образуется дефект FTS на основе фаз Al_3Fe и Al_6F; а при скорости охлаждения во время кристаллизации более 15÷20 °C/c формируется дефект FTS, состоящий из фаз Al_6Fe и Al_mFe (рис. 3). Поэтому необходимо подбирать такую скорость литья, чтобы происходило вытеснение дефекта FTS в корковую зону слитка, которая потом может быть легко удалена путем стандартного скальпирования.
Таким образом, скорость охлаждения возле поверхности слитка является основным фактором, предотвращающим образование дефекта FTS, но остальные параметры литья также оказывают определенное влияние на образование данного дефекта.

Низкий рабочий уровень расплава в кристаллизаторе также способствует смещению дефекта FTS на поверхность слитка, уменьшает толщину корковой зоны и, как следствие, снижается глубину слоя при скальпировании слитка.

В случае возникновения дефекта FTS необходимо изменить следующие параметры литья в сторону увеличения скорости охлаждения: температуру литья в литейном лотке повысить до 700÷710 °C; скорость литья увеличить

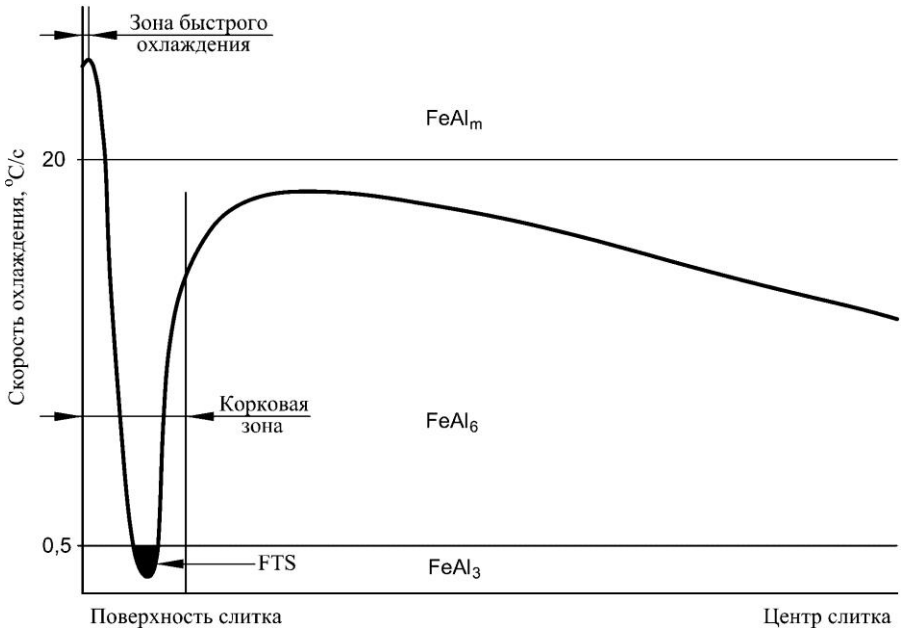


Рисунок 3 – Взаимосвязь между скоростью охлаждения и фазовым составом Al-Fe в плоском слитке

на 15 %, до 60÷65 мм/мин; уровень металла в кристаллизаторе снизить до 50 мм; подачу воды в системе охлаждения от обычного значения увеличить на 7÷10 %; подачу смазки снизить максимально, т.к. излишняя смазка ухудшает условия теплообмена.

Появление ПКС в слитках сплавов 1XXX серии приводит к неисправимому браку при изготовлении из них фольги или литографических пластин. Основными причинами появления ПКС являются:

1. Способы подачи расплавленного металла в кристаллизатор.

При вертикальной подаче металла из лотка в кристаллизатор происходит вынос центров зарождения зерен из твердожидкой фазы нижней части лунки слитка. Поэтому необходимо направлять потоки металла в горизонтальной плоскости, перпендикулярно движению слитка в литейной машине. Применение электромагнитного поля при литье резко уменьшает количество плавающих кристаллов из-за самой природы процесса перемешивания.

2. Интенсивность образования центров кристаллизации.

В первую очередь связано с применением неэффективных модификаторов и местами их ввода в лотковую систему или задерживанием модифицирующих добавок (центров кристаллизации) современными фильтрами тонкой очистки металла, как например металлофильтрами PTF (Mitsui).

3. Скорость литья играет немаловажную роль в образовании ПКС.

Снижение скорости литья уменьшает вынос закристаллизовавшихся зерен из нижней части жидкой лунки слитка, но при этом уменьшается производительность.

4. Снижение уровня расплава в кристаллизаторе и высокая скорость охлаждения в совокупности являются ограничителями роста зерна, что отрицательно сказывается на образовании ПКС.

5. Низкая температура литья металла способствует появлению плавающих кристаллов.

Микроструктура в областях с плавающими кристаллами принципиально не отличается от характерной для слитка. Микротвердость плавающих

кристаллов составляет 25±2 кгс/мм^2, что практически не отличается от микротвердости основного сплава, которая составляет 27±2 кгс/мм^2.

Установлено, что дефект ВС представляет собой разновидность столбчатых кристаллов и возникает в результате роста кристаллов в виде пластинчатых двойников, чему благоприятствует высокий температурный градиент в кристаллизаторе и спокойное состояние расплава в лунке. Поэтому ВС образуется в периферийной зоне слитка (рис. 4).

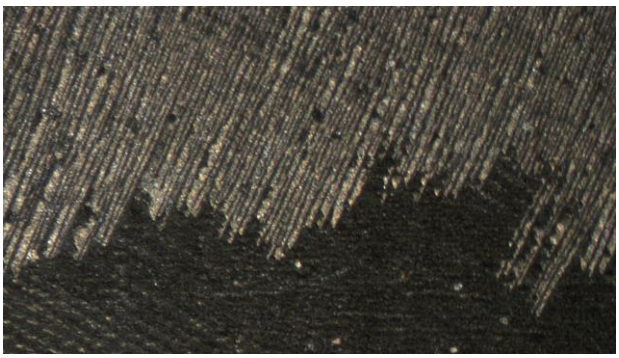


Рисунок 4 – Веерная структура слитка

Механизм и причины образования ВС научно обоснованы в работах В. И. Напалкова, которые нашли свое подтверждение при производстве плоских слитков сплавов 1XXX серии на предприятиях ОК РУСАЛ. Основными причинами образования и методами борьбы с ВС могут быть:

1. Завышенная температура литья во время производства слитков;
2. Низкая скорость литья;

Для алюминиевых сплавов 1XXX серии критическая температура образования ВС составляет > 720 ^{o}C.

При увеличении скорости литья возрастает средняя скорость кристаллизации, что способствует получению равноосной структуры в слитке. Этим фактором в некоторой степени можно регулировать структуру слитка, но чрезмерное повышение скорости литья приводит к возникновению диаметральных трещин и появлению пористости за счет уменьшения скорости охлаждения центра слитка. Практика литья показывает, что в слитках сплавов 1XXX серии ВС уже не образуется при скоростях литья более 20 мм/мин.

3. Недостаточное количество центров кристаллизации для формирования однородной мелкозернистой структуры;

В качестве модификаторов в основном выступает лигатуры системы Al-Ti-B. При содержании модифицирующих элементов Ti, Zr–в пределах 0,5÷1,0 % веерная структура в слитках не наблюдается. При этих концентрациях циркония она не образуется даже в присутствии хрома.

4. Применение кристаллизаторов с электромагнитным перемешиванием (ЭМК) жидкой сердцевины.

Понижение и выравнивание температуры металла в жидкой лунке слитка является основной причиной измельчения структуры при литье в ЭМК. Это вызывает увеличение числа центров кристаллизации, т.к. возрастает время нахождения расплава в переохлажденном состоянии (ниже линии ликвидус).

5. Равномерная подача расплава в кристаллизатор;

ВС не образуется при подаче расплава в кристаллизатор через распределительную воронку, приподнятую над его уровнем. В местах ввода расплава образуется мелкая столбчатая структура, известная под названием «треф».

6. Содержание элементов, таких как Ti, Cr, Zr, Mg, Cu, Zn и Si и наличие их в больших количествах способствуют формированию ВС;
7. Повышенная интенсивность охлаждения водой в кристаллизаторе.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований влияния технологических параметров процессов литья и кристаллизации были научно обоснованы рациональные температурно-скоростные режимы литья и кристаллизации плоских слитков сплавов 1XXX серии, гарантирующих отсутствие дефектов в виде FTS, ВС и ПКС, а также уровень заданных свойств.

В четвертой главе приведены результаты исследования процесса модифицирования слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии. Одним из основных факторов, влияющих на формирование качества слитков из алюминиевых сплавов (мелкое зерно, структурная однородность, отсутствие поверхностных и внутренних дефектов), является модифицирующая лигатура на основе системы Al-Ti-B. К сожалению, данные лигатуры в России до настоящего времени не производятся, а основными производителями являются голландская фирма KBM Affilips, немецкие, китайские, индийские и южнокорейские компании. Однако, как показывает производственный опыт, не всегда удается получить мелкозернистую и однородную структуру по всему объему слитка при использовании модифицирующих лигатур указанных производителей. Причины кроются, как в качестве самих лигатур, так и в технологии введения их в расплав. Поэтому исследования по дальнейшему совершенствования процесса модифицирования алюминиевых сплавов являются по-прежнему актуальными.

Для исследования влияния на эффективность модифицирования лигатур различного состава (AlTi5B1, AlTi3B1, AlTi5B0,2) и различных производителей (KBM Affilips и HOESCH), а также мест ввода лигатурного прутка были проведены опытные плавки сплавов 1050 и 1200 в литейном отделении алюминиевого завода. Отливка слитков осуществлялась на литейном агрегате в кристаллизатор Epsilon. Литье слитков производилось с применением термоформованных распределителей металла с глухим дном, имеющим по 3 отверстия в боковых стенах. Рафинирование расплава при литье слитков производилось с применением установки SNIF P-140UHB. Предварительная фильтрация производилась через трубчатый металлофильтр (MTF), тип 2803 (Mitsui), а окончательная - через пенокерамический фильтр (ПКФ) с пористостью 40 ppi. Эффективность модифицирования анализировали по методике Alcan-Test при сопоставлении макро-и микроструктур, механических свойств и технологичности при прокатке отобранных образцов.
Места отбора проб и введения модифицирующей лигатуры представлены на рис. 5.

Исследование модифицирующего действия лигатурного прутка, вводимого на разных стадиях серийной технологии литья слитков (до SNIF – проба 51, 54, после SNIF перед ПКФ – проба 52) показало, что место введе-

ния прутка в условиях проводимых экспериментов не оказало влияние на макроструктуру исследуемых проб диаметром 40 мм.

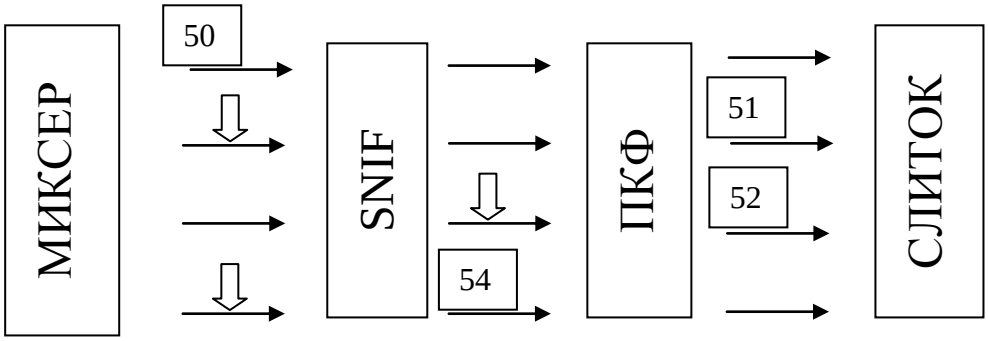
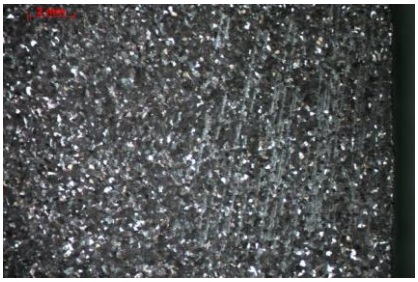


Рисунок 5 – Непрерывная схема введения модификатора и отбора проб в технологической цепочке получения слитков (☐ – место отбора проб; ⇩ – место введения лигатурного прутка)

Исследование влияния модифицирования сплава 1050 при введении прутковой лигатуры AlTi5B1 и AlTi5B0,2 производства КВМ проводили на разных стадиях технологической цепочки литья слитков фольгового качества размером 560x1340 мм. При этом в периферийных зонах слитков, модифицированных лигатурой AlTi5B0,2, была обнаружена грубая ВС на глубине 130÷150 мм от поверхности слитка (рис. 6), для лигатуры AlTi5B1 данного дефекта не наблюдалось.



а

б

Рисунок 6 – Веерная структура: а – модифицирование лигатурой AlTi5B0,2 до SNIF; б – после SNIF

Поэтому введение лигатуры AlTi5B1 препятствует образованию ВС в слитках и оказывает более сильное модифицирующее действие по сравнению с лигатурой AlTi5B0,2. При металлографическом анализе сплавов 1200 и 1050 выявлено, что модифицирование не влияет на размер дендритных ячеек, меняет только их форму и однородность распределения.

Для исследования деформируемости металла применялись темплеты прямоугольной формы толщиной 15 мм, полученные на различных этапах технологической цепочки литейного передела: 50 – перед SNIF (из миксера); 51 – с лотка после модифицирования перед SNIF; 52 – с лотка перед ПКФ. На этих образцах моделировали процесс прокатки, состоящий из двух этапов: горячей прокатки до толщины 1 мм и холодной прокатки до толщины 0,1 мм. В процессе опытов от деформированных полос отбирались образцы, которые подвергали испытаниям на разрыв с целью определения механических

свойств металла. Результаты исследования (рис. 7) показали, что деформируемость образцов практически одинаковая, при этом их удалось прокатать без разрушения и применения промежуточных операций отжига со степенью деформации 98,7%. Механические свойства литых и прокатанных образцов из сплава 1050 представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Механические свойства литых и деформированных полуфабрикатов из сплава 1050

Номер образца	Литое состояние		Толщина, мм	Степень деформации при прокатке, %	Деформированное состояние	
	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %			Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
50	74	38	3,1	80	158	7,3
			1	93,3	230	2
			0,2	98,7	250	0,5
51	76	38	3,1	79,8	171	8
			1	93,3	240	3,7
			0,2	98,7	250	1
52	77	39	3	80	170	7,7
			1	93,3	240	3,7
			0,2	98,7	250	1

Установлено, что с увеличением количества модификатора AlTi5B1 производства KBM Affilips до 2 кг/т повышаются пластические свойства алюминиевых сплавов 1XXX серии, а прочностные свойства остаются на том же уровне.

При компьютерном моделировании распределения интерметаллидов, при модифицировании лигатурами различного состава (AlTi5B1, AlTi3B1, AlTi5B0,2) алюминиевого сплава 1XXX серии было установлено, что наиболее благоприятное распределение интерметаллидов по сечению литейного желоба наблюдается при введении в расплав лигатурного прутка марки AlTi5B1. Для гомогенного распределения интерметаллидов в расплаве рекомендуется подача лигатурного прутка одновременно в 4 колодца на выходе из фильтра Mitsui (рис. 8).

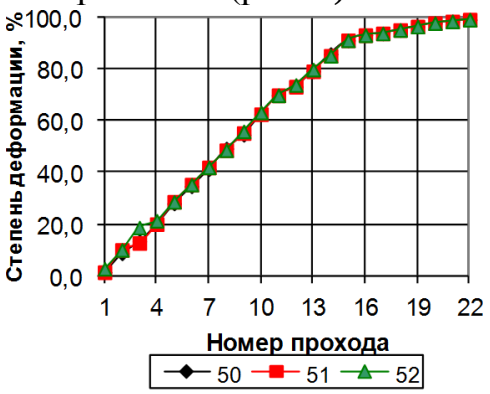


Рисунок 7 – Изменение степени деформации образцов по проходам

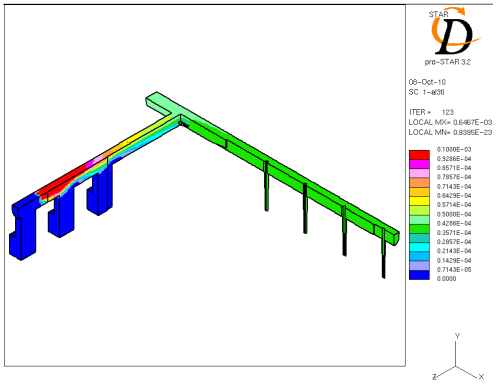


Рисунок 8 – Распределения Al_3Ti по продольной оси металлотракта при введении в расплав лигатурного прутка марки AlTi5B1

В пятой главе представлены новые технические и технологические решения в области производства плоских слитков из алюминиевых сплавов. В результате анализа проведенных теоретических и экспериментальных исследований в настоящей работе был разработан технологический регламент по производству плоских слитков сплавов 1XXX серии для заводов ОК РУСАЛ, позволяющий исключить образование дефектов в виде ПКС, ВС и FTS.

При производстве плоских слитков сплавов 1XXX серии в соответствии с настоящим регламентом следует контролировать следующие параметры: температуру металла в лотке 700÷710 °С, содержание Ti в миксере 0,01%; расход лигатуры AlTi5B1 – 2 кг/т; скорость литья 60÷65 мм/мин; уровень металла в кристаллизаторе 50 мм, расход воды в системе охлаждения, температуру воды 15÷25 °С.

Технологические параметры литья плоских слитков сечением 560x1230 мм сплавов 1XXX серии с использованием литейной оснастки «Wagstaff» представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технологические параметры литья плоских слитков

Температура металла, ^{o}C				Скорость литья при длине слитка		Расход воды при длине слитка		Уровень металла в кристаллизаторе при длине слитка	
Миксер	SNIF	МТФ	Раздат. желоб	длина, мм	скорость, мм/мин.	длина, мм	расход, $м^3$/час	длина, мм	уровень, мм
740±5	740	750	700-710	пуск	43	пуск	70	пуск	50
				125	43	90	70	125	74
				400	65	361	210	187	76
				-	-	-	-	460	50

В опытной партии плоских слитков сплавов 1XXX серии, отлитой по новой технологии и разработанной нормативно-технологической документации в литейном отделении завода ОК РУСАЛ на ЛА (Wagstaff) не обнаружено каких-либо дефектов в виде образования плавающих кристаллов, веерной и елочной (fir-tree) структуры, а качество изготовленных слитков полностью удовлетворяло заказчиков.

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 Alcan Test обладает рядом преимуществ для повышения точности при исследовании и анализе модифицирующей способности лигатур (рис. 9).

Созданная установка РУСАЛ ТЕСТ использовалась во время проведения исследований в настоящей работе и зарекомендовала себя только с положительной стороны.

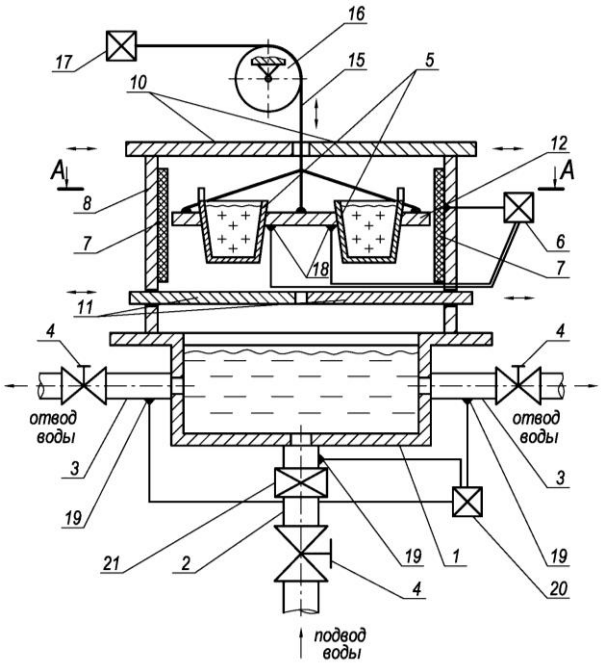


Рисунок 9 - Общий вид установки для исследования модифицирующей способности лигатур (РУСАЛ ТЕСТ)

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан технологический регламент на производство плоских слитков 1XXX серии.
2. Металлографическими исследованиями обосновано появление дефектов в виде ПКС, ВС и FTS при кристаллизации слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии с условиями образования метастабильных Al_6Fe, Al_mFe и стабильной Al_3Fe фаз.
3. На основе обобщения экспериментального материала рассмотрен механизм и установлены следующие закономерности для возникновения дефекта FTS:

– при соотношения концентраций содержания железа и кремния $1,5 < Fe/Si < 3,5$;

– при скорости охлаждения во время кристаллизации менее 0,5 °С/с образуется дефект FTS на основе фаз Al_3Fe и Al_6F;

– при скорости охлаждения во время кристаллизации более 15÷20 °С/с–формируется дефект FTS, состоящий из фаз Al_6Fe и Al_mFe;

– примеси с концентрацией более: Ni – 50÷70 ppm; Mg – 50÷70 ppm; V – 250 ppm; Ca – 5 ppm; Cr – 50÷70 ppm; TiB_2 – 0,03%.

3. Показано, что зона с ПКС не имеет существенных отличий от характерной микроструктуры слитков, и образование ПКС не связано с интерметаллидами, присутствующими в модифицирующем лигатурном прутке.
4. Научно обоснованы температурно-скоростные режимы литья плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии, гарантирующие отсутствие дефектов в виде ПКС, ВС, FTS.
5. Разработана методика по определению эффективности модифицирующей лигатуры в технологическом цикле производства плоских слитков из алюминиевых сплавов, позволяющих исключить операцию резки слитков для отбора макротемплетов.

6. На основе компьютерного моделирования установлено, что наиболее благоприятное распределение интерметаллидов по сечению литейного желоба наблюдается при введении в расплав лигатурного прутка марки AlTi5B1, а для равномерного распределения интерметаллидов в расплаве рекомендуется подача лигатурного прутка одновременно в 4 колодца на выходе из фильтра Mitsui.
7. Разработан комплекс новых технических решений, включающий:
– установка для исследования модифицирующей способности лигатур;
– устройство для непрерывного литья и прессования методом конформ (патент на полезную модель № 155319 U1 Российская Федерация, МПК B22D 11/06);
– устройство для непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов методом конформ (патент на полезную модель № 156614 U1 Российская Федерация, МПК B22D 11/06).
8. Разработанные технологические и технические решения внедрены в производство и позволили произвести товарную продукцию в виде плоских слитков различного сечения по заказу компаний Constellium и Novelis Korea без дефектов веерной, елочной структуры и плавающих кристаллов с годовым экономическим эффектом 584 тыс. руб. (2015 г.) и 1,1 млн. руб. (2016 г.).
9. Результаты исследований внедрены в учебный процесс и используются при обучении магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и магистерской 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. Влияние технологических факторов на образование дефектов структуры в крупнотоннажных слитках из алюминиевых сплавов серии 1XXX / **В.Ф. Фролов**, С.В. Беляев, И.Ю. Губанов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – № 2. – С. 25–31 **(рекомендуемое из перечня ВАК).**
2. О модифицировании слитков из алюминиевых сплавов серии 1XXX / **В.Ф. Фролов**, В.Б. Деев, С.В. Беляев [и др.] // Металлургия машиностроения. – 2016. – № 4. – С. 15–18 **(рекомендуемое из перечня ВАК).**
3. Исследование процесса образования мелкозернистой структуры в плоских слитках из алюминиевых сплавов серии 5XXX / **В.Ф. Фролов**, С.В. Беляев, А.И. Безруких [и др.] // Цветные металлы и минералы 2015: сб. докладов VII междунар. конгресса. – Красноярск, 2015. – С. 1099–1100.
4. Применение математического моделирования для расчета распределения лигатурной составляющей в литейном желобе и при разработке технологии непрерывного литья плоских слитков / А.А. Ильин, **В.Ф. Фролов**, Я.А. Тре-

тьяков [и др.] // Цветные металлы и минералы 2015: сб. докладов VII междунар. конгресса. – Красноярск, 2015. – С. 1101–1105.
5. Влияние технологических факторов на образование дефектов макроструктуры в плоских слитках из алюминиевых сплавов серии lXXX, 8XXX / **В.Ф. Фролов**, Т.А. Орелкина, Д.В. Гусев [и др.] // Сборник докладов VII Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». – Красноярск, 2015. – С. 1159–1165.
6. 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.
7. Авдулов, А.А. Электромагнитный модификатор структуры слитка в роторной литейной машине / А.А. Авдулов, В.Н. Тимофеев, С.А. Бояков, **В.Ф. Фролов** // Цветные металлы и минералы 2014: сборник тезисов докладов шестого международного конгресса. – Красноярск: Версо, 2014. – С. 1003-1009.
8. Патент на полезную модель № 155319 U1 Российская Федерация, МПК B22D 11/06 – № 2015107359/02. Устройство для непрерывного литья и прессования методом конформ / С.В. Беляев, Ю.В. Горохов, **В.Ф. Фролов** [и др.]; заявл. 03.03.2015; опубл. 27.09.2015 Бюл. № 27.
9. Патент на полезную модель № 156614 U1 Российская Федерация, МПК B22D 11/06 – №2015107480/02. Устройство для непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов методом конформ / С.В. Беляев, Ю.В. Горохов, **В.Ф. Фролов** [и др.]; заявл. 03.03.2015; опубл. 10.11.2015 Бюл. № 31.

Подписано в печать 02.09.2016. Печать плоская. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ 2976

Отпечатано Библиотечно-издательским комплексом
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. 8(391)206-26-67, http://bik.sfu-kras.ru
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru