

На правах рукописи



Сидоров Александр Юрьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПЛОСКИХ СЛИТКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ 5XXX СЕРИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОРИСТОСТИ**

05.16.04 – Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск – 2021

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

Научный руководитель:

Деев Владислав Борисович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», лаборатория «Ультрамелкозернистые металлические материалы», главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

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

Батышев Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра «Технология обработки материалов», профессор.

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

Защита состоится 20 декабря 2021 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.404.01 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 348.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Лесив Елена Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Российское предприятие ОК РУСАЛ является одним из мировых лидеров в алюминиевой промышленности, непрерывно совершенствуя действующие и внедряя новые технологические процессы для дальнейшего повышения эффективности производства. Одним из перспективных направлений деятельности ОК РУСАЛ является производство крупногабаритных плоских слитков (КГПС) из алюминиевых сплавов 5XXX серии для последующего изготовления из них плит, форм и других изделий для нужд литейного производства. Однако данная продукция не всегда удовлетворяет требованиям, предъявляемым заказчиками, особенно по пористости. В этой связи разработка научно-обоснованных технических и технологических решений для обеспечения требуемого уровня пористости крупногабаритных плоских слитков из алюминиевых сплавов 5XXX серии является актуальной научно-технической задачей.

Настоящая работа выполнялась в соответствии с Федеральной программой «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, 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 науки и высшего образования Российской Федерации, а также по договору на выполнение работ по заказу ОК «РУСАЛ» по теме «Разработка технических решений по снижению среднего линейного размера пор не более 60 мкм в плоских слитках из сплава 5083».

Степень разработанности темы. Исследованиями таких отечественных ученых, как М.Б. Альтман, А.И. Батышев, К.А. Батышев, В.Д. Белов, Н.А. Белов, А.И. Беляев, Б.И. Бондарев, А.А. Бочвар, И.Г. Бродова, А.И. Вейник, С.М. Воронов, Б.Б. Гуляев, В.Б. Деев, В.И. Добаткин, Г.Г. Крушенко, Д.П. Ловцов, В.И. Напалков, В.И. Никитин, К.В. Никитин, Хосен Ри, Э.Х. Ри, И.Ф. Селянин, А.Г. Спасский и др. разработаны научные основы плавки и кристаллизации алюминия и его сплавов, внесен существенный вклад в развитие теории и технологии получения качественных отливок из них, что явилось в настоящей работе научной и методологической базой при совершенствовании технологии плавки и литья слитков из алюминиевых сплавов 5XXX серии. Вместе с тем, поставленная в работе задача снижения пористости по объему слитков для алюминиевых сплавов 5XXX серии остается актуальной и требует проведения дополнительных исследований в данном направлении.

Объектом исследований являются алюминиевые сплавы 5XXX серии, технологические процессы, материалы, литейная оснастка и оборудование

для производства КГПС методом полунепрерывного литья (ПЛ).

Цель и задачи работы. Целью работы являлось разработка технических и технологических решений, обеспечивающих снижение пористости в объеме крупногабаритных плоских слитках из алюминиевых сплавов 5XXX серии, полученных методом полунепрерывного литья.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Усовершенствовать методику определения пористости в объеме КГПС в производственных условиях;
2. Разработать компьютерную модель образования пористости при ПЛ КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии;
3. Исследовать влияние конструктивных и технологических параметров полунепрерывного литья КГПС на распределение пористости в объеме КГПС 5XXX серии;
4. Разработать и внедрить в промышленных условиях литейного производства ОК РУСАЛ эффективную технологию изготовления КГПС 5XXX серии для снижения среднего линейного размера пор до значений не более 60 мкм в объеме слитка.

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

1. Разработана компьютерная модель образования пористости при ПЛ КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии, учитывающая их физико-химические свойства и конструктивные и технологические параметры полунепрерывного процесса литья КГПС.

2. Установлены закономерности образования пористости в КГПС (численными расчетами на примере сплава 5083), заключающиеся в том, что параметры пористости линейно зависят от размеров зерна и дендритной ячейки в структуре слитков, при этом средний размер пор возрастает от периферии слитка (30 мм от края) к центру (170 мм от края) с 28 до 152 мкм, при этом минимальный средний объем пористости в сечении слитка составляет 0,169 % для слитка 600x1630 мм при уровне металла в кристаллизаторе 45 мм и скорости литья 40 мм/мин; максимальный средний объем пористости по сечению слитка составляет 0,289 % для слитка 600x1750 мм при уровне металла 57 мм и скорости литья 50 мм/мин.

3. Установлено, что в сплавах 5XXX серии максимальная объемная доля пор (до 0,5 %) располагается на расстоянии, равном $\frac{1}{4}$ ширины слитка от его прокатной поверхности, превышая более чем в 3 раза объемную долю пор на расстоянии 30 мм от прокатной поверхности и в 1,5 раза – объемную долю пор в середине КГПС.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Реализован численный расчет образования пористости при ПЛ КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии с использованием программных комплексов ProCAST и ANSYS.

2. Разработаны и внедрены новые технические и технологические решений для производства КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии, основные из которых следующие:

- новый технологический регламент для реализации технологии ПЛ КГПС из сплавов 5XXX серии с регламентированными параметрами пористости, что подтверждается соответствующим актом опытно-промышленных испытаний и отражено в разработанном ВТР 440.02.07.02 «Технологический регламент производства плоских слитков из сплавов 5XXX серии с размером пор не более 60 мкм»;

- переносное устройство для отбора пробы жидкого металла, патент РФ на полезную модель № 183559;

- способ отбора пробы жидкого металла», патент РФ № 2665585;

- установку для непрерывного литья плоских слитков, патент РФ № 2697143;

- кристаллизатор для литья алюминиевых слитков, патент РФ № 2659548;

- кристаллизатор для литья алюминиевых слитков, патент РФ на полезную модель № 182014.

3. Результаты исследований внедрены в учебный процесс Сибирского федерального университета 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.

Реализация результатов работы.

Результаты работы внедрены на предприятиях ОК РУСАЛ.

Методы исследований. Работа выполнена с учетом известных закономерностей теории и технологии литейных процессов, с применением современных методов исследования микроструктуры, механических свойств, химического состава, содержания водорода; и статистического анализа данных; численных методов решения и компьютерного моделирования с использованием программных комплексов ProCAST и ANSYS.

На защиту выносятся следующие положения:

- методика исследования, прогнозирования и контроля показателей пористости и структуры КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии;

- результаты компьютерного моделирования образования пористости во время кристаллизации КГПС с учетом конструктивных и технологических параметров ПЛ;

- новые технические и технологические решения производства КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии с регламентируемой пористостью.

Личный вклад автора заключается в научной постановке задач исследования, планировании экспериментов и выборе методик исследования, организации и проведении экспериментов в лабораториях ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный университет» и проведении опытно-промышленных

испытаний в производственных условиях на заводах ОК РУСАЛ, обработке результатов экспериментов, в обобщении и научном обосновании результатов, в формулировании выводов и рекомендаций, участии в написании научных статей и патентов.

Настоящая работа является продолжением научно-исследовательских работ, выполняемых на кафедре «Литейное производство» Института цветных металлов и материаловедения СФУ в рамках научно-исследовательских работ с ОК «РУСАЛ». Включенные в диссертацию и выносимые на защиту результаты настоящей работы представляют собой часть общих результатов научно-исследовательских работ по рассматриваемой проблеме, которые были выполнены автором с соавторами за годы совместной работы и были получены непосредственно автором или при его ведущем участии.

Степень достоверности научных положений и полученных результатов обоснована:

- применением современных методов исследований алюминиевых сплавов, компьютерного моделирования и статистической обработки результатов;
- сопоставлением результатов исследований с результатами других исследователей в этой области;
- практической реализацией полученных результатов в условиях действующего производства и эффективностью предложенных технических и технологических решений.

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

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на VII, VIII и IX Международных конгрессах «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2016-2019 гг.), а также на научно-методических семинарах кафедры «Литейное производство» Сибирского федерального университета и ООО «РУСАЛ ИТЦ» в 2016-2020 гг.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 15 печатных работах, в том числе в 3 статьях в журналах, рекомендуемых в Перечне ВАК РФ, в 2 статьях в изданиях, включенных в базу SCOPUS и в 10 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, основных выводов, списка литературы, содержащего 112 источни-

ков, и 3 приложений. Основной материал изложен на 136 страницах, включая 21 таблицу и 80 рисунков.

ОСНОВНОЕ 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 проанализировано современное состояние исследований в области развития производства слитков и рассмотрены проблемы качества КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии. Показано, что одним из востребованных продуктов ОК РУСАЛ на рынке потребления после первичного алюминия являются КГПС, по объемам выпуска которых более трети приходится на сплавы 5XXX серии. В ОК РУСАЛ для изготовления КГПС применяется современное оборудование, литейная оснастка и материалы, при этом основным способом изготовления КГПС является метод вертикального полунепрерывного литья (ПЛ).

Образование усадочной и газовой пористости в объеме КГПС из алюминиевых сплавов всегда неизбежно, так как во время кристаллизации усадка алюминия и его сплавов составляет более 7%. При этом происходит резкое снижение растворимости водорода в расплаве алюминия (примерно в 14 раз больше по сравнению с остальными металлами). Для КГПС 5XXX серии, к которой относится сплав 5083, при ПЛ КГПС возникают еще следующие дополнительные проблемы:

- увеличенный интервал кристаллизации, возрастающий от 10 до 50°C с увеличением содержания магния в алюминиевых сплавах 5XXX серии от 2 до 6 масс. %, что способствует образованию усадочной раковины в верхней части слитка и пористости, расположенной в центральной части слитка под лункой;

- обратная зональная ликвация основного легирующего металла Mg, что приводит к разному химическому составу в горизонтальном сечении и к перераспределению пористости в объеме слитка.

Поэтому пористость является одним из основных дефектов внутренней структуры КГПС, резко снижающим механические и эксплуатационные свойства продукции, и составляет более 25% от всех видов брака по внутренней структуре для КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии.

Современные представления об образовании пор объединяют газовую и усадочную пористость в понятие газо-усадочной пористости, так как разряжение, создаваемое усадочной порой, способствует образованию разности парциальных давлений в гетерогенной системе, тем самым заполняя усадочную пору молекулярным водородом. В тоже время, газовая пора служит концентратором напряжения во время протекания процесса усадки, а растягивающие силы, возникающие во время затвердевания, образуют усадочную пору.

Пористость в КГПС можно разделить на следующие виды:

- в пространстве – на водородную пористость, расположенную по всему объему слитка, и усадочную пористость, расположенную в местах слитка, затвердевающих последними (лунка у КГПС);

- по времени – на первичную пористость, которая образуется в объеме слитка в процессе литья, и вторичную пористость, образующуюся в твердом слитке после последующей термомеханической обработки.

Объем первичной пористости линейно возрастает по мере увеличения содержания водорода в расплаве. При уменьшении содержания водорода в сплаве пористость уменьшается и исчезает при некоторой критической концентрации водорода, ниже которой водород находится в пересыщенном твердом растворе и не образует первичной пористости. В алюминии технической чистоты пористость не образуется при содержаниях водорода менее $0,10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

Структура и пористость слитков из алюминиевых сплавов зависит от таких технологических факторов, как химический состав сплава и наличие в расплаве неконтролируемых или специально введенных примесей (модификаторов) для создания новых центров кристаллизации; температуры литья, предварительного перегрева над ликвидусом и времени выдержки расплава; скорости кристаллизации и высоты кристаллизатора и др. Только некоторые из этих факторов поддаются точной оценке и их воздействия можно прогнозировать. Поэтому выявить конкретную взаимосвязь между многообразием факторов и параметрами кристаллизации и пористостью слитка очень сложно. Качественный анализ влияния различных факторов на формирование пористости при полунепрерывном литье слитков достаточно подробно изложен в работах В.И. Добаткина и В.И. Напалкова. Однако по количественному анализу исследования пористости в объеме слитков и разработке эффективной технологии изготовления слитков с регламентируемым размером пор в доступной научной литературе имеющиеся сведения весьма отрывочны.

На основании анализа литературных данных о существующем российском и международном опыте по вопросам качества КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии были сделаны выводы, поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены использованные методики проведения исследований (в том числе разработанные и усовершенствованные автором) для определения в алюминиевых сплавах водородной и усадочной пористости, микро- и макроструктуры слитков, механических и технологических свойства. Объектом исследований были промышленные алюминиевые сплавы 5XXX серии, химический состав соответствовал требованиям ГОСТ 4784-97.

Эксперименты проводились в лабораторных и промышленных условиях. Опытные плавки реализовывались в литейном отделении на литейных машинах в условиях действующего производства. Плавка и литье сплавов

проводились с применением установки рафинирования HD 2000 и дегазатора марки SNIF; фильтрация производилась через трубчатый металлофильтр марки Mitsui. КГПС отливались с применением термоформованных распределителей металла Combo-bag. Модифицирование расплавов осуществлялось прутковой лигатурой *Al-Ti-B* из расчета 1÷3 кг/т расплава.

Исследование пористости проводили с помощью инвертированного металлографического микроскопа марки OLYMPUS GX71/GX51 и с применением программного комплекса для металлографического анализа Thixomet.PRO по методике СТО 04.02.040-2017 «Определение параметров пористости металлографическим методом». Размер единичных пор и очагов пористости оценивали на площади микрошлифов 4 см², а объемную долю пор оценивали на площади 1 см².

Характерная микроструктура КГПС с элементами междендритной пористости представлена рисунке 1.

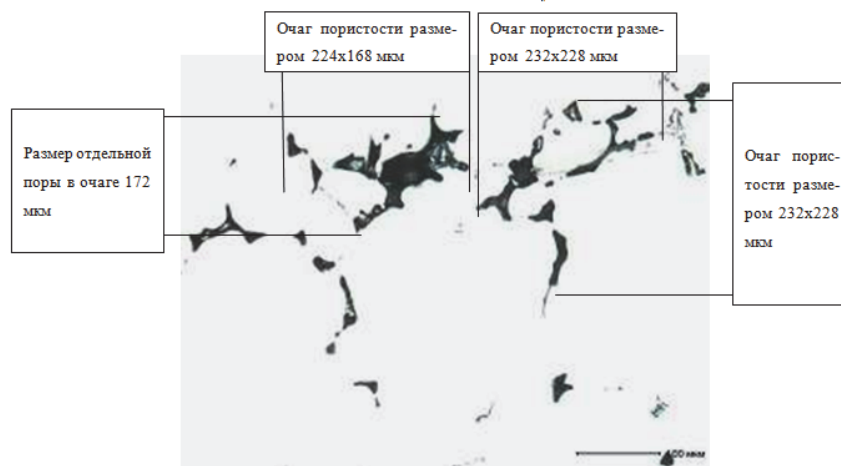


Рисунок 1 – Микроструктура образцов из КГПС с междендритной пористостью

Микрошлифы изготавливали на автоматизированных шлифовально-полировальных станках Saphir 520 (Germany) с использованием расходных материалах фирмы Lam Plan (France). Для микроструктурного анализа изготавливались образцы, вырезанные из проб в зонах слитка с наиболее типичной кристаллической структурой.

Для определения среднего размера каждой отдельной поры определяли ее максимальный и минимальный линейный размер (F_1 и F_2). За размер поры принимали среднее арифметическое значение линейных размеров:

$$d = \frac{F_1 + F_2}{2}, \quad (1)$$

где: F_1 и F_2 – максимальный и минимальный диаметры Фере соответственно; d – средний размер отдельной поры.

За средний размер пор на фрагменте (на образце, вырезанном из темплета с целью оценки параметров пористости) принимали среднее арифметическое значение всех проанализированных отдельных пор по формуле:

$$D_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \quad (2)$$

где: D_{CP} – средний размер пор на фрагменте; d_i – средний размер отдельной поры; n – количество пор на фрагменте.

Аналогично определяли средние размеры очагов пор.

Контроль содержания водорода в расплаве и в объеме КГПС осуществляли на газоанализаторах «G8 Galileo» и анализаторе водорода RH 402 фирмы (Leco Corporation, США), руководствуясь ГОСТ 21132.1-98 «Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы определения водорода в твердом металле вакуум-нагревом»; ГОСТ 21132.0-75 «Алюминий и сплавы алюминиевые. Метод определения содержания водорода в жидком металле»; ГОСТ Р 50965-96 «Алюминий и сплавы алюминиевые. Метод определения водорода в твердом металле».

Как правило, концентрация водорода в расплаве на основных этапах литейного передела изготовления КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии от электролизера и до литейной машины изменяется в пределах от 0,20 до 0,10 см³/100 г расплава *Al*. Для повышения точности пробоотбора на газо-содержание было разработано специальное переносное устройство для отбора пробы из алюминиевого расплава сразу во время движения его по металлотрактору к литейной машине (патент РФ на полезную модель № 183559 «Переносное устройство для отбора пробы жидкого металла»).

Для повышения оперативности и точности контроля содержания водорода в расплаве разработан новый способ (патент РФ № 2665585 «Способ определения содержания водорода в алюминиевых сплавах»), включающий отбор расплава, его последующую кристаллизацию сразу в двух подогреваемых тиглях: один под атмосферным давлением, а другой под низким давлением, и измерение разности плотностей полученных слитков. Во время кристаллизации расплава на образец в тигле под низким давлением воздействуют ультразвуком, а образец в тигле под атмосферным давлением подвергают прессованию в пруток с вытяжкой не менее 5 и по полученной разности плотностей образцов определяют содержание водорода.

В третьей главе представлены результаты исследований морфологии пористости как совокупной характеристики пор, включающей в себя их размер, форму и пространственную ориентацию, в зависимости от конструктивных и технологических параметров ПС КГПС с помощью компьютерного моделирования и во время проведения опытно-промышленных плавов.

Для проведения компьютерного моделирования применялся программные комплексы ProCAST и ANSYS. В качестве модели использовался полный объем слитка, разбитый на характерные зоны по охлаждению. Для ими-

тации движения слитка при литье использовалось условие движения твердой фазы, равное скорости литья. Данное условие позволило учесть различные коэффициенты теплопередачи в процессе литья по высоте слитка.

Моделировали процесс кристаллизации и затвердевания КГПС размерами 600×1630 мм и 600×1750 мм, изготавливаемых методом ПС в кристаллизаторе скольжения. При компьютерном моделировании учитывали применение модификаторов системы *Al-Ti-B* и распределение движения потоков расплава при циркуляции в лунке с учетом влияния распределительной коробки (Combo-bag) с фильтрующими элементами в виде сетки. Все это позволило максимально приблизить разработанную компьютерную модель к реальному процессу литья КГПС.

При решении задачи по распределению микропористости в объеме КГПС была разработана модель с использованием продвинутого решателя микропористости. Данная модель учитывает температурное поле в зависимости от интенсивности охлаждения слитка и скорости литья, а также с учетом уровня жидкого металла в кристаллизаторе при помощи условия гидростатического давления жидкого металла над зоной кристаллизации. На рисунке 2 представлен общий вид температурного поля КГПС в разрезе. На рисунке 3 представлено распределение пористости по сечению слитка для одного из вариантов моделирования.

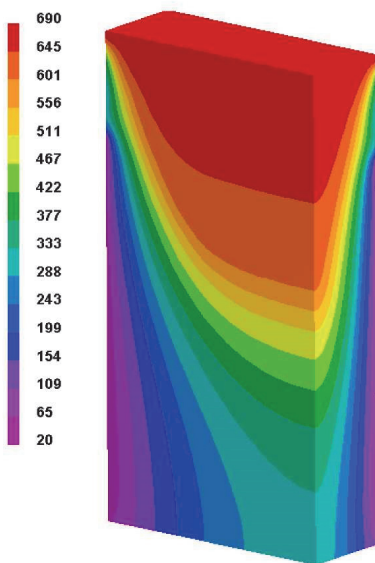


Рисунок 2 – Температурное поле КГПС в разрезе, °С

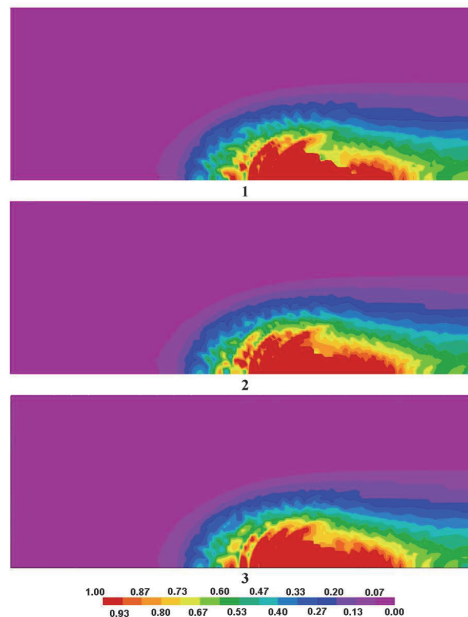


Рисунок 3 – Распределение пористости в объеме слитка размером 600×1630 мм, скорость литья 40 мм/мин (уровень металла: 1 – 45 мм; 2 – 51 мм; 3 – 57 мм)

Шкала пористости изменялась в пределах от 0 до 1%. Пористость определяли в центральном сечении на расстоянии 30 мм от края слитка (точка 1) и в точке 2 на расстоянии 170 мм от края слитка. Для перерасчета размера поры из процентов объема применялась упрощенная методика. Исходя из размера элемента в модели с гранью, равной 5,0 мм, выполнялся перерас-

чет процента пористости на плоскости, равной 25 мм^2 , и вычислялась площадь, занимаемая порой. Далее принималась толщина поры, равная $1,0 \text{ мкм}$, и вычислялась ее возможная длина на плоскости, соответствующая занимаемой площади в модели.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы: от периферии слитка (30 мм от края слитка, точка 2 к центру (170 мм от края слитка, точка 1) пористость увеличивается; с увеличением уровня расплава в кристаллизаторе и скорости литья растет величина пористости в отливке; минимальный средний размер пористости в сечении слитка составляет $0,169 \%$ для слитка 600×1630 при уровне металла в кристаллизаторе 45 мм и скорости литья 40 мм/мин ; максимальный средний размер пористости по сечению слитка составляет $0,289 \%$ для слитка 600×1750 при уровне металла 57 мм и скорости литья 50 мм/мин .

Данные результаты компьютерного моделирования образования пористости в объеме КГПС являлись научной базой при проведении исследований влияния технологических параметров на образование пористости в объеме КГПС непосредственно в промышленных условиях. На первом этапе анализировали размер пористости в объеме КГПС из сплавов 5083, 5182 и 5052, изготовленных по «штатной» заводской технологии в литейном отделении алюминиевого завода ОК РУСАЛ.

Результаты количественного анализа исследований текущей пористости в объеме КГПС из сплава 5083 представлены на рисунке 4.

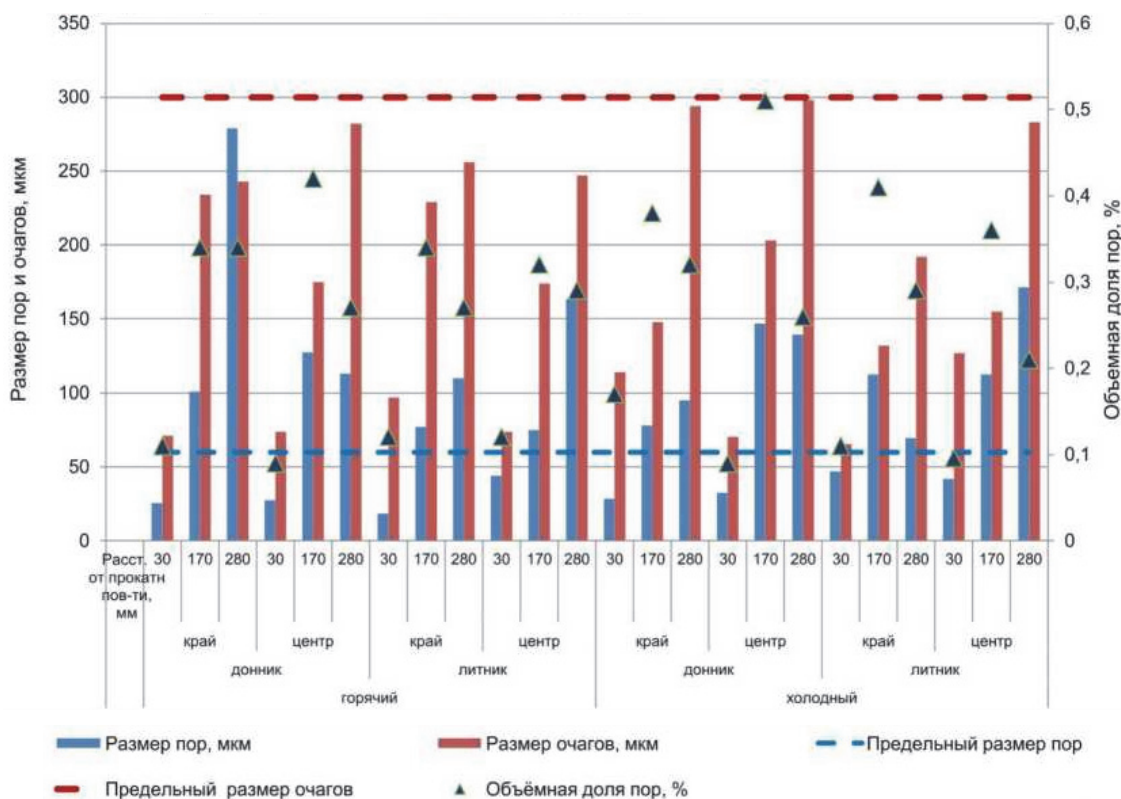


Рисунок 4 – Распределение единичных пор, очагов пор и объемной доли пористости по сечению темплата из сплава 5083

Проведенные исследования пористости в объеме КГПС из сплавов 5083, 5182 и 5052 показали, что на расстоянии 30 мм от прокатной поверхности наблюдаются минимальные значения по всем параметрам пористости (таблица 1). На расстоянии 170 мм от прокатной поверхности объемная доля пор наибольшая, и размер единичных пор и очагов более грубый, чем на расстоянии 280 мм от прокатной поверхности. Размер пор в слитке на расстоянии 170 и 280 мм от прокатной поверхности превышает 60 мкм ($70 \div 280$ мкм) и не соответствует требованиям по размеру единичных микропор (не более 60 мкм) и очагов пор (не более 300 мкм).

Таблица 1 – Параметры пористости в объеме КГПС из сплавов 5XXX серии

Сплав	Технология	Средний размер единичной поры, мкм	Средний размер очагов микропористости, мкм	Средний размер зерна, мкм
5083	штатная	92,9	176,4	108
5182		73,5	145,8	104
5052		68,4	120,8	102

В четвертой главе представлены новые технические и технологические решения, обеспечивающих снижение пористости в объеме КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии. На основе анализа результатов компьютерного моделирования и последующих опытно-промышленных испытаний заводская технология литья КГПС была скорректирована следующим образом: увеличен расход модифицирующей лигатуры до 2,5 кг/т; расход аргона в SNIF P-180 до 7,5 м³/ч; скорость вращения ротора SNIF P-180 до 540 об/мин; при этом уменьшена скорость литья на 10 мм/мин; поднят уровень расплава в кристаллизаторе на 10 мм и проведено обязательное рафинирование в миксере через установку HD-2000 с использованием рафинирующего гранулированного флюса марки Promag SI расходом 1,5 кг/т при скорости вращения ротора 210 об/мин с обязательным использованием бесфосфатных пенокерамических фильтров вместо традиционных алюмофосфатных.

Технологические параметры литья КГПС из сплава 5083 по усовершенствованной технологии представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технологические параметры литья КГПС

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

Изготовление партии КГПС из сплава 5083 сечением 600×2000×8000 мм проводили в литейном отделении металлургического завода ОК РУСАЛ с использованием следующего оборудования: поворотные миксера емкостью 70 т с трубчатыми нагревателями, расположенными под сводом миксера и оснащенными донными МГД-перемешивателями; установка для рафинирования расплава SNIF P-180УНВ; металлофильтр «MITSUI», модель 2803; фильтробокс для установки двух ПКФ сечением 584×584×50 мм с пористостью 50 ppi, производства Drahe; литейная машина «Wagstaff Shurcast»; кристаллизаторы типа «Epsilon», предназначенные для производства КГСП 5XXX серии.

Характерная микропористость КГПС из сплава 5083 показана на рисунке 5, а размер зерна и параметры пористости в зависимости от размера зерна – на рисунках 6 и 7.

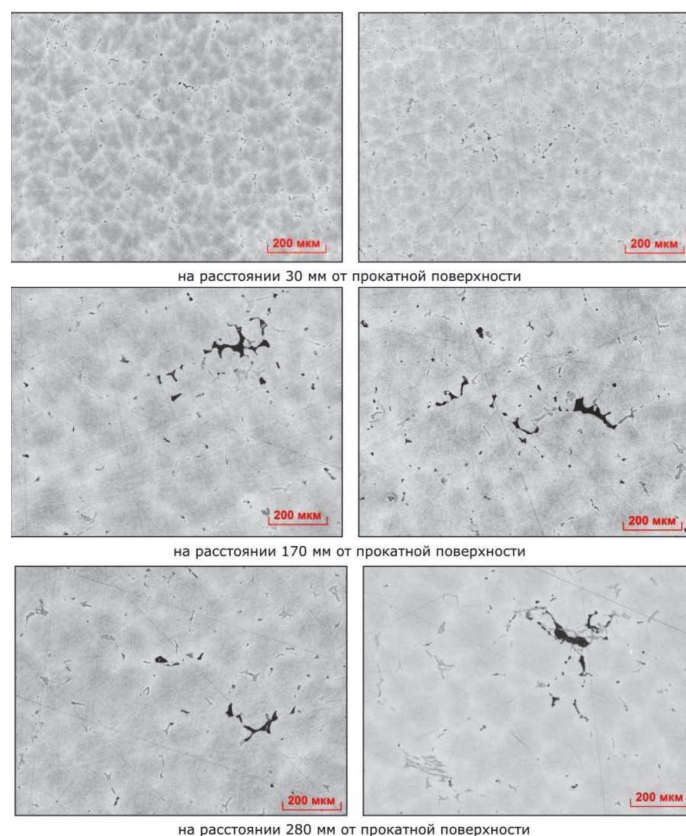


Рисунок 5 – Микроструктуры образцов из слитков сплава 5083 в областях с максимальной пористостью

На основании проведенных исследований по определению параметров пористости в КГПС сечением 600×2000 мм сплава 5083, изготовленных по новой технологии, можно сделать следующие выводы:

1. Линейный размер единичных пор в опытных слитках уменьшился в зоне 30 и 170 мм от прокатной поверхности на 10 мкм, в зоне 280 мм от про-

катной поверхности – на 45 мкм по сравнению с КГПС, изготовленными по серийной технологии.

2. На расстоянии 170 мм от прокатной поверхности в исследуемых слитках снизилась объемная доля пор, но при этом увеличился размер очагов пористости.

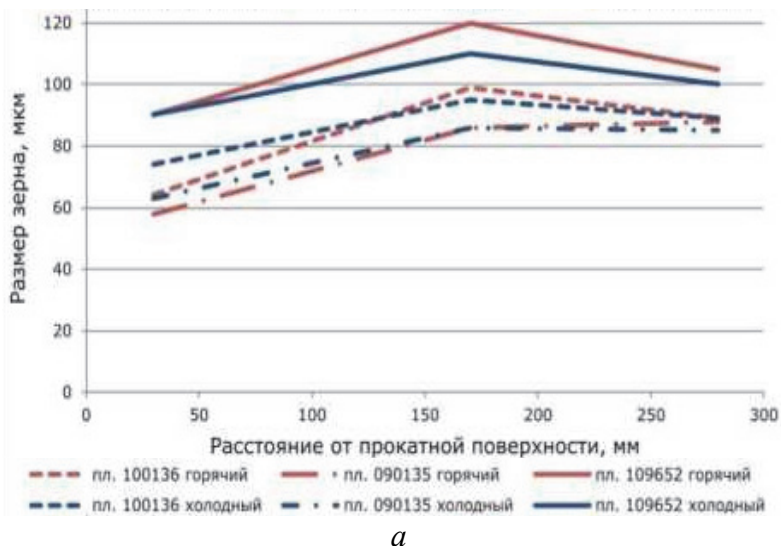


Рисунок 6 – Изменение размера зерна по сечению КГПС из сплава 5083:

а – донник; *б* – литник

3. Размер зерна слитков уменьшился в среднем на 20 мкм по сравнению с действующей технологией модифицирования при литье КГПС из сплава 5083. Размер пор менее 60 мкм в исследуемых слитках наблюдается при размере зерна менее 80 мкм.

4. Размер единичных пор и объемная доля пор практически линейно зависят от размера зерна КГПС.

5. КГПС из сплава 5083, изготовленные по разработанной технологии в литейном отделении ОК РУСАЛ, полностью соответствуют всем показателям качества, имеют мелкозернистую структуру по сечению, обладают средним размером пор менее 60 мкм и удовлетворяют всем требованиям потре-

бителей. Данные положения подтверждаются соответствующим Актом опытно-промышленных испытаний и отражены в разработанном и утвержденном ВТР 440.02.07.02 «Технологический регламент производства плоских слитков из сплавов серии 5XXX с размером пор не более 60 мкм».

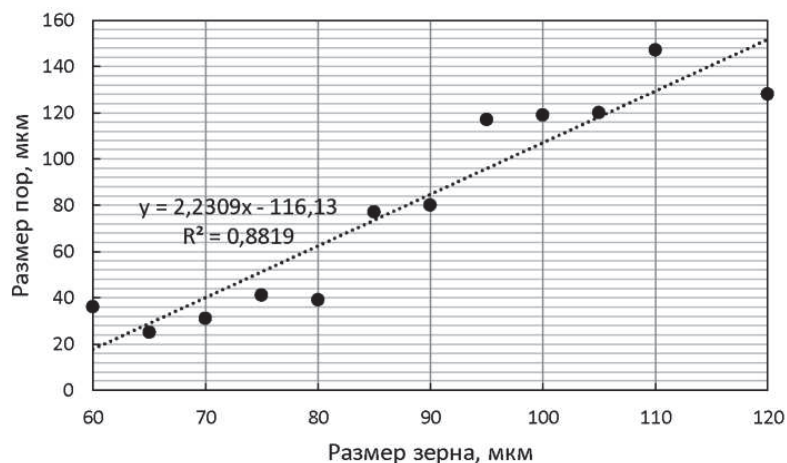


Рисунок 7 – Изменение размеров пор в зависимости от размера зерна КГПС

Для изготовления КГПС заданного качества из алюминиевых сплавов (5083, 5182 и 5052) методом полунепрерывного литья необходимо оперативно управлять термодинамическими условиями процесса кристаллизации, в частности, скоростью охлаждения поверхностей слитка по его периметру и высоте в зонах первичного и вторичного охлаждения, и обеспечивать равенство температур на противоположных поверхностях слитка. Для решения данной проблемы была разработана установка для полунепрерывного литья плоских слитков (патент РФ № 2697143).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа научно-технической литературы и обобщения экспериментального материала установлены следующие особенности образования пористости в объеме КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии:

- объем первичной пористости линейно возрастает при увеличении размера зерна и содержания водорода в расплаве и снижается при увеличении скорости кристаллизации;

- при снижении содержания водорода в расплаве менее 0,10 см³/100 г сплава практически отсутствует первичная газовая пористость;

- распространение рассеянной пористости увеличивается по направлению к центру отливки.

2. Усовершенствована методика определения пористости в объеме КГПС, соответствующая современным требованиям мировых потребителей продукции и гарантирующая высокую степень достоверности полученных экспериментальных результатов.

3. Разработана компьютерная модель образования пористости с использованием программных комплексов ProCAST и ANSYS для полунепрерывного литья КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии, которая учитывает их физико-химические свойства, конструктивные и технологические параметры процесса, в том числе заливку расплава в кристаллизатор через распределительную коробку Combo Bag.

4. Анализ результатов компьютерного моделирования процесса кристаллизации и затвердевания КГПС из сплава 5083 при варьировании скорости литья 40÷60 мм/мин и уровня расплава в кристаллизаторе 45÷57 мм позволил установить следующие закономерности формирования пористости в структуре слитков:

- от периферии слитка (30 мм от края слитка) к центру (170 мм от края слитка) размер пор увеличивается от 28 до 152 мкм;

- минимальный средний объем пористости в сечении слитка составляет 0,169 % для слитка 600×1630 при уровне металла в кристаллизаторе 45 мм и скорости литья 40 мм/мин;

- максимальный средний объем пористости по сечению слитка составляет 0,289 % для слитка 600×1750 при уровне металла 57 мм и скорости литья 50 мм/мин.

5. Количественный анализ сравнительных исследований пористости в объеме КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии (5083, 5182 и 5052), проведенных в литейном отделении ОК РУСАЛ, подтвердил установленные выше закономерности и установил характерные особенности для рассматриваемых условий полунепрерывного литья:

- параметры пористости линейно зависят от размеров зерна и дендритной ячейки слитков, поэтому увеличиваются по направлению к центру КГПС;

- в доннике горячего и холодного слитка размер очагов пор всегда меньше, чем в литнике;

- во всех объемах холодного слитка средний размер пор всегда больше, чем горячем слитке;

- максимальный средний размер единичных пор в горячем и холодном слитках наблюдается в центральной части донника;

- максимальный размер очагов пор в горячем слитке находится в крайней части литника и донника, а в холодном слитке в центральной части литника и донника;

- максимальная объемная доля пор располагается на расстоянии, равном $\frac{1}{4}$ ширины слитка от его прокатной поверхности, превышая более чем в 3 раза объемную долю пор на расстоянии 30 мм от прокатной поверхности и в 1,5 раза объемную долю пор в середине слитка.

6. Разработаны и внедрены подкрепленные рядом патентов РФ новые технические и технологические решения для производства КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии, основные из которых:

- новый технологический регламент для реализации технологии полунепрерывного литья КГПС из сплавов 5XXX серии с регламентированными параметрами пористости, что подтверждается соответствующим актом опытно-промышленных испытаний и отражено в разработанном ВТР 440.02.07.02 «Технологический регламент производства плоских слитков из сплавов серии 5XXX с размером пор не более 60 мкм»;

- переносное устройство для отбора пробы жидкого металла, патент на полезную модель РФ № 183559;

- способ определения содержания водорода в алюминиевых сплавах, патент РФ № 2665585;

- установку для непрерывного литья плоских слитков, патент РФ № 2697143;

- кристаллизатор для литья алюминиевых слитков, патент РФ № 2659548;

- кристаллизатор для литья алюминиевых слитков, патент РФ на полезную модель № 182014.

7. 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.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных изданиях:

1. **Сидоров А.Ю.** Моделирование образования пористости при полунепрерывном литье крупногабаритных плоских слитков из алюминиевых сплавов / А.Ю. Сидоров, В.Б. Деев, В.Ф. Фролов [и др.] // *Металлургия машиностроения*. 2020. № 4. С. 34-38.

2. **Сидоров А.Ю.** Особенности формирования микропористости в крупногабаритных плоских слитках из алюминиевых сплавов 5XXX серии / А.Ю. Сидоров, В.Б. Деев, В.Ф. Фролов [и др.] // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2020. Том 17. № 3. С. 338–342.

3. **Сидоров А.Ю.** Усовершенствование конструкции кристаллизатора для изготовления крупногабаритных плоских слитков из алюминиевых сплавов / А.Ю. Сидоров, В.Б. Деев, В.Ф. Фролов [и др.] // *Литейщик России*. 2020. № 6. С. 15–22.

4. Baranov V.N. Improving the Manufacturing Technology of Al-Ti Modifier for Aluminum Alloys / V.N. Baranov, S.V. Belyaev, **A.Yu. Sidorov** [etc] // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 15. №.11. June, 2020. P. 1263–1267.

5. **Sidorov A.Yu.** Porosity study for semi-continuous casting of flat ingots from alloy 5083 / A.Yu. Sidorov, V.B. Deev, S.V. Belyaev [etc] // *ARPN Journal*

of Engineering and Applied Sciences. Vol. 15. №17. September, 2020. P. 1902–1909.

6. Патент на полезную модель № 174042 U1 Российская Федерация, МПК G01N 1/10 - № 2017114262, Устройство для отбора пробы жидкого металла / Беляев С.В., Фролов В.Ф., Куликов Б.П., Деев В.Б., Баранов В.Н., Губанов И.Ю., Богданова Т.А., Лесив Е.М., **Сидоров А.Ю.** [и др.]; заявл. 24.04.2017; опубл. 27.09.2017 Бюл. № 27.

7. Патент на полезную модель № 175093 U1 Российская Федерация, МПК G01N 1/10 - № 2017114265, Устройство для отбора пробы жидкого металла из металлотракта / Беляев С.В., Фролов В.Ф., Деев В.Б., Баранов В.Н., **Сидоров А.Ю.** [и др.]; заявл. 24.04.2017; опубл. 20.11.2017 Бюл. № 32.

8. Патент № 2639105 C1 Российская Федерация, МПК C22C 1/03 - № 2016146204, Способ литья изделий из алюминиевых сплавов / **Сидоров А.Ю.**, Фролов В.Ф., Костин И.В. [и др.]; заявл. 24.11.2016; опубл. 19.12.2017 Бюл. № 35.

9. Патент № 2659548 U1 Российская Федерация, МПК B22D11/07, B22D11/04 - № 2017130078, Кристаллизатор для литья алюминиевых слитков / **Сидоров А.Ю.**, Вербицкий О.В., Пелевин А.Г., [и др.]; заявл. 24.08.2017; опубл. 02.07.2018 Бюл. № 22.

10. Патент на полезную модель 182014 U1 Российская Федерация, МПК B22D11/055 - № 2017136922, Кристаллизатор для литья алюминиевых слитков / **Сидоров А.Ю.**, Вербицкий О.В., Пелевин А.Г., [и др.]; заявл. 19.10.2017; опубл. 31.07.2018 Бюл. № 22.

11. Патент № 2665026 Российская Федерация, МПК - № 2017132126, Способ литья алюминиевых плоских слитков / **Сидоров А.Ю.**, Фролов В.Ф., Костин И.В. [и др.]; заявл. 13.09.2017. опубл. 24.08.2018.

12. Патент № 2665585 C1 Российская Федерация, МПК G01N 9/02, G01N 1/10, G01N 33/20 - № 2017115426, Способ определения содержания водорода в алюминиевых сплавах / Беляев С.В., Фролов В.Ф., Деев В.Б., Баранов В.Н., **Сидоров А.Ю.** [и др.]; заявл. 02.05.2017; опубл.: 31.08.2018 Бюл. № 25.

13. Патент на полезную модель № 183559 U1 Российская Федерация, МПК G01N 1/10, G01N 33/20 - № 20181123850, Переносное устройство для отбора пробы жидкого металла / Беляев С.В., Фролов В.Ф., Губанов И.Ю., Баранов В.Н., **Сидоров А.Ю.** [и др.]; заявл. 29.06.2018; опубл.: 25.09.2018 Бюл. № 27.

14. Патент № 2697143 C1 Российская Федерация, МПК B22D 11/055, B22D 11/16 - № 2018128716, Установка для непрерывного литья плоских слитков / Баранов В.Н., Фролов В.Ф., Беляев С.В., **Сидоров А.Ю.** [и др.]; заявл. 19.12.2017; опубл.: 12.08.2019 Бюл. № 23.

15. Патент № 2714453 C1 Российская Федерация, МПК B22D 11/103 - № 2019116712, Установка для полунепрерывного литья плоских слитков / Беляев С.В., Баранов В.Н., **Сидоров А.Ю.** [и др.]; заявл. 21.12.2018; опубл.: 17.02.2020 Бюл. № 5.

Подписано в печать _____ .2021 г. Печать плоская. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 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>