

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Сидоров Александр Юрьевич

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

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д-р техн. наук, проф.  
Деев Владислав Борисович

Красноярск – 2021

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА .....	10
1.1 Схема и основное оборудование для производства крупногабаритных плоских слитков .....	10
1.2 Анализ пористости в КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии .....	16
1.3 Предпосылки использования компьютерного моделирования процесса полунепрерывного литья .....	31
1.4 Выводы по главе и постановка цели и задач исследования .....	32
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	34
2.1 Методика определения пористости в объеме КГПС .....	34
2.2 Плавка сплавов и получение КГПС в производственных условиях .....	42
2.3 Методика анализа на содержание водорода в расплаве алюминия .....	45
2.4 Выводы по главе 2 .....	49
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОРИСТОСТИ ПРИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ КГПС ИЗ СПЛАВОВ 5XXX СЕРИИ .....	50
3.1 Компьютерное моделирование морфологии пористости при полунепрерывном литье КГПС .....	50
3.2 Исследование пористости в КГПС в условиях промышленного производства .....	57
3.3 Выводы по главе 3 .....	74
ГЛАВА 4 НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОРИСТОСТИ В ОБЪЕМЕ КГПС ИЗ СПЛАВОВ 5XXX СЕРИИ .....	76
4.1 Разработка и внедрение технологии производства КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии с регламентированным размером пор .....	76
4.2 Новые технические решения в области производства КГПС .....	89
4.3 Выводы по главе 4 .....	99
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ .....	100

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	103
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ О ВНЕДРЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ .....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ .....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС .....	120

## ВВЕДЕНИЕ

**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, 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 решения 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 произ-

водства 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;

- установка 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.

**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 105 источников, и 3 приложений. Основной материал изложен на 120 страницах, включая 19 таблиц и 74 рисунка.

## ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

### 1.1 Схема и основное оборудование для производства крупногабаритных плоских слитков

В настоящее время продукция ОК «РУСАЛ» экспортируется в 70 стран мира. При этом предприятие непрерывно увеличивает производственные мощности за счет установки современного оборудования и активно развиваются. Рисунок 1.1 показывает в общем виде объемы продаж ОК РУСАЛ.

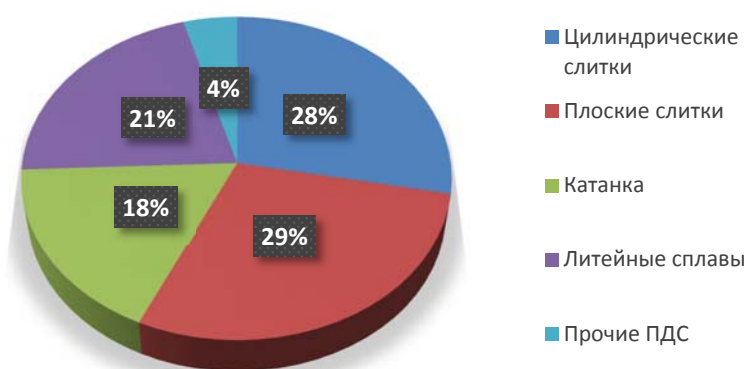


Рисунок 1.1 – Объемы продаж ОК РУСАЛ по основной продукции, %

По объемам выпуска среди ПДС больше всего приходится на сплавы 1XXX и 5XXX серий (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Объемы выпуска КГПС основных серий сплавов, %

КГПС 5XXX серии относятся к сплавам системы Al-Mg и постоянное использование получили в машиностроении с 1940-х гг. Благодаря тому, что сплавы прочные, коррозионностойкие, поддаются резанию и сварке, заготовки из них

находят широкое применение во многих отраслях промышленности – судостроении, авиастроении, автостроении и др.

В таблице 1.1 приведен состав сплавов 5XXX серии (ТУ 1713–098–05785276–01).

Таблица 1.1 – Химический состав сплавов 5XXX серии

Обозначение марок		Массовая доля элементов, %											
НД	ИСО 209-1	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие элементы	Прочие элементы		Al
											Отдельн.	Сумма	
AMг 0,5	-	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4-	-	-	-	-	0,05	0,1	остальное
1505						0,8							
AMг1	AlMg1	0,30	0,7	0,20	0,20	0,50-	0,10	0,25	-	-	0,05	0,15	то же
1510	<b>5005</b>					1,1							
AMг 1,5	AlMg1,5	0,40	0,7	0,20	0,10	1,1-	0,10	0,25	-	-	0,05	0,15	то же
	<b>5050</b>					1,8							
AMг 2	AlMg2	0,40	0,50	0,15	0,1-	1,8-	0,05	0,15	0,15	-	0,05	0,15	то же
1520	<b>5251</b>				0,6	2,6							
AMг 2,5	AlMg2,5	0,25	0,40	0,10	0,10	2,2-	0,15-	0,10	-	-	0,05	0,15	то же
	<b>5052</b>					2,8	0,35						
AMг3	-	0,5-	0,5	0,1	0,3-	3,2-	0,05	0,2	0,1	-	0,05	0,1	то же
1530		0,8			0,6	3,8							
-	AlMg3	0,40	0,40	0,10	0,50	2,6-	0,30	0,20	0,15	Mn+ Cr:	0,05	0,15	то же
	<b>5754</b>					3,6				0,10-0,6			
AMг3,5	AlMg3,5	0,25	0,40	0,10	0,10	3,1-	0,15-	0,20	0,20	Be:	0,05	0,15	то же
	<b>5154</b>					3,9	0,35			0,0008			
										Mn+ Cr:			
										0,10-0,50			
AMг 4,0	AlMg4	0,40	0,50	0,10	0,20-	3,5-	0,05-	0,25	0,15	-	0,05	0,15	то же
1540	<b>5086</b>				0,7	4,5	0,25						
AMг 4,5	AlMg4,5	0,40	0,40	0,10	0,40-	4,0-	0,05-	0,25	0,15	-	0,05	0,15	то же
	<b>5083</b>				1,0	4,9	0,25						
	AlMg4,5Mn0,4	0,20	0,35	0,15	0,2-	4,0-	0,10	0,25	0,10		0,05	0,15	то же
	<b>5182</b>				0,5	5,0							
-	AlMg5Cr	0,30	0,40	0,10	0,05-	4,5-	0,05-	0,10	-	-	0,05	0,15	то же
	<b>5056</b>				0,20	5,6	0,20						
AMг5	-	0,5	0,5	0,1	0,3-	4,8-	-	0,2	0,02-	Be:	0,05	0,1	то же
1550					0,8	5,8			0,10	0,0002-0,005			
AMг 6	-	0,4	0,4	0,1	0,5-	5,8-	-	0,2	0,02-	Be:	0,05	0,1	то же
1560					0,8	6,8			0,10	0,0002-0,005			

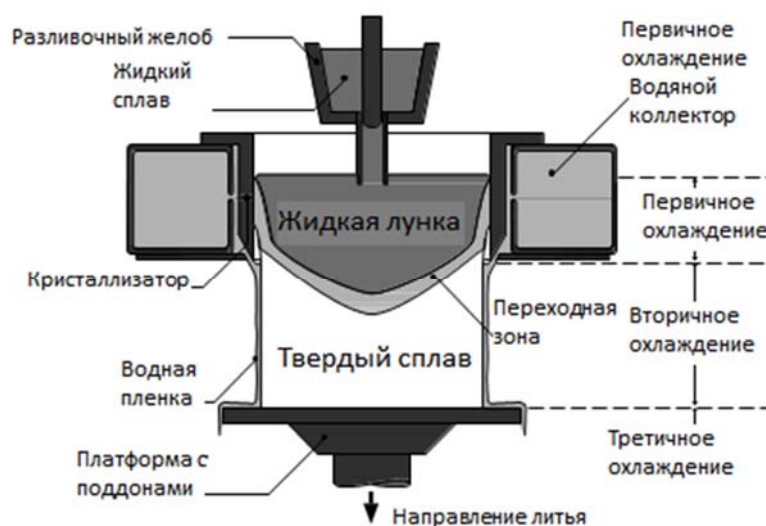


Рисунок 1.3 – Схема принципа полунепрерывного литья

Схема принципа полунепрерывного литья приведена на рисунке 1.3.

Для производства КГПС применяется миксер, гидропрокидыватель, машины для литья полунепрерывным способом, литейные ковши, в также следующее – технологическая оснастка, весы для статического взвешивания (ГОСТ 29329-92), весы SKALEX–500 фирмы «PIVOTEX», специальная печь для сушки флюсов.

Камерную поворотную отражательную печь, представленную на рисунке 1.4, применяют как миксер.



Рисунок 1.4 – Миксер

Миксер включает несъемный свод с навесными трубчатыми нагревателями (рисунок 1.5). Его основная задача – выдержка расплава, его корректировка по температурным и химическим показателям, и дальнейший выпуск расплава.



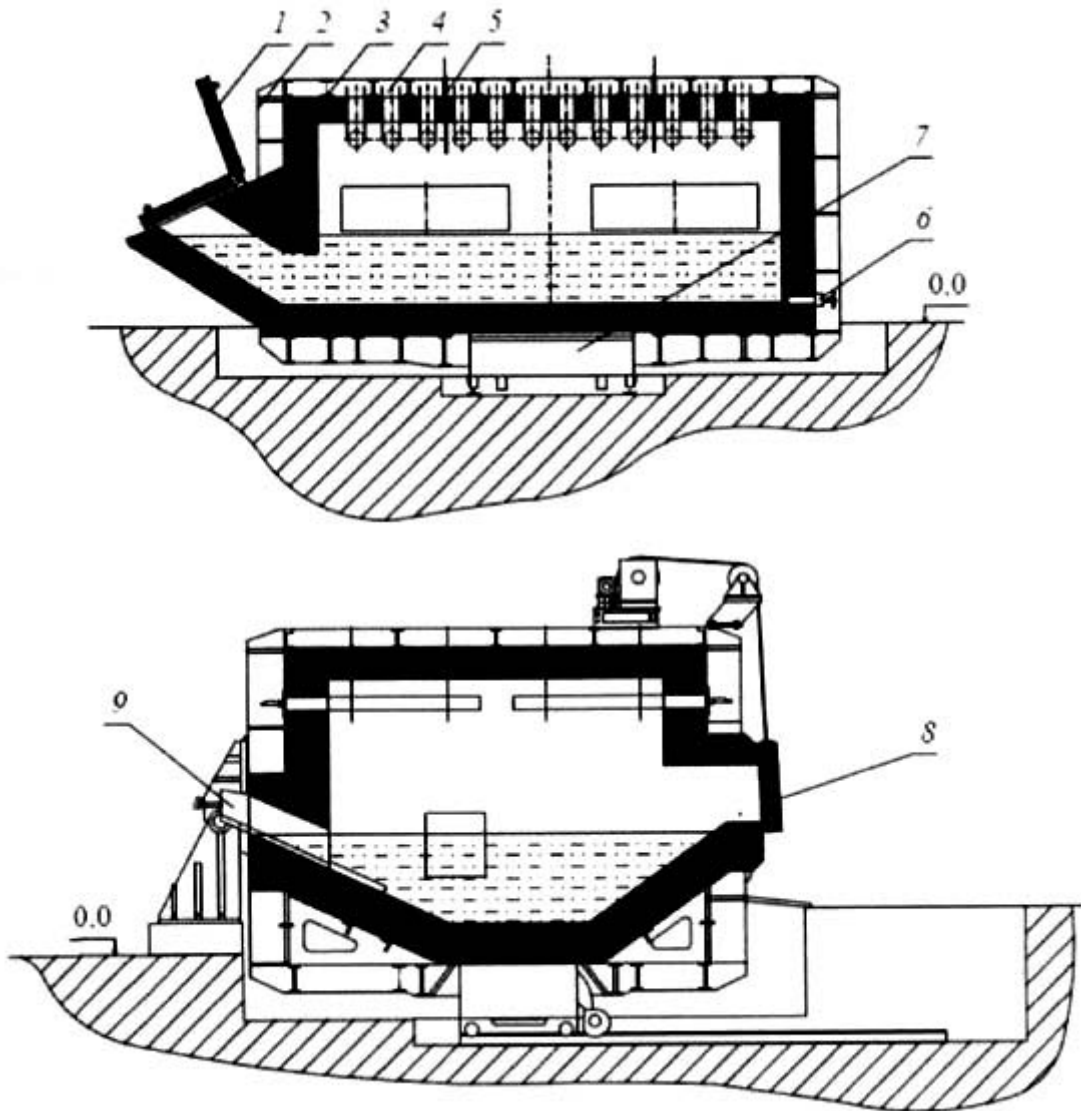


Рисунок 1.5 – Схема миксера:

1 – заливочная крышка; 2 – кожух; 3 – футеровка; 4 – нагревательные элементы; 5 – термопара для контроля температуры печи; 6 – летка аварийного слива; 7 – магнитно-гидродинамический перемешиватель; 8 – рабочее окно; 9 – сливной носок [1, 2]

На предприятиях ОК РУСАЛ перемещение расплава алюминия от электролизов к месту разлива реализуется ковшами (специальные стальные бадьи с огнеупорной футеровкой). Для этого в миксере, который принимает расплав, предусмотрено соответствующее окно (или колодец) для заливки жидкого металла. Для обеспечения безопасной транспортировки и легким опрокидыванием ковша (для слива) точки подвеса располагаются немного выше центра тяжести ковша (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Заливка расплава алюминия из ковша в миксер

Для литья слитков используется вертикальная литейная машина, показанная на рисунке 1.7.

Кристаллизаторы, поддоны, коллектора и распределительные лотки – это специальная технологическая оснастка. Кристаллизатор обеспечивает размер и геометрическую форму слитков [2, 3] (рисунок 1.8).

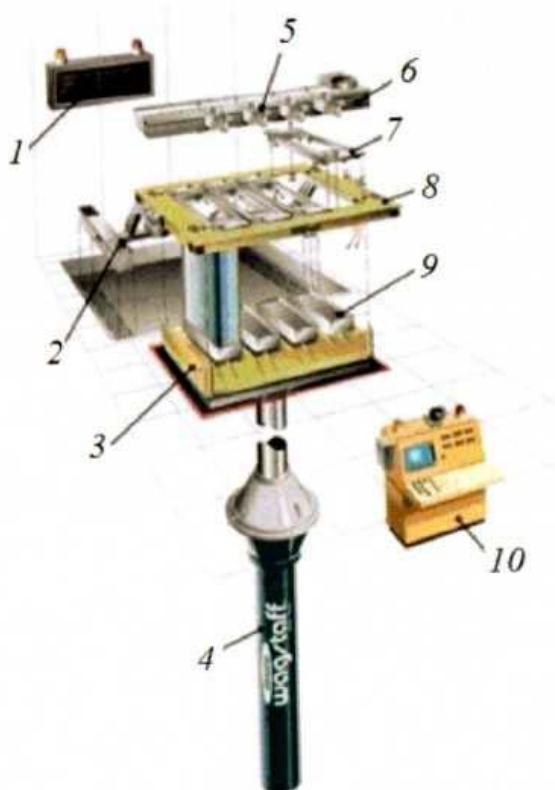


Рисунок 1.7 – Схема литейной системы Wagstaff для прокатных слитков:

1 – информационный дисплей; 2 – поворотный механизм литейного стола; 3 – платформа для поддонов ShurStart; 4 – литейный цилиндр ShurCast, 5 – система лазерного регулирования уровня металла в кристаллизаторе, 6 – распределительный желоб LaundAir; 7 – кристаллизатор Epsilon; 8 – литейный стол; 9 – поддоны; 10 – пульт управления системы AutoCast [2, 3]



Рисунок 1.8 – Кристаллизатор [2, 3]



Рисунок 1.9 – Поддон [4, 5].

Поддон, показанный на рисунке 1.9, применяется с целью формирования донной части слитков и их поддерживания в процессе литья [4, 5].

Коллектор применяется для подачи охлаждающей воды в кристаллизатор непосредственно в процессе литья слитков. Распределительный лоток предназначен для подвода металла к кристаллизатору через втулку [4, 5].

Процесс литья слитков проходит в следующем порядке: подгон поддона в кристаллизатор; установка распределительного лотка (втулка должна находиться в центре кристаллизатора); установка Combo-Back в каждый кристаллизатор; подача охлаждающей воды в кристаллизатор; осуществление команды «поворот миксера»; заполнение расплавом кристаллизатор на  $1/3$  высоты; включение рабочего хода стола [4, 5].

## 1.2 Анализ пористости в КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии

Готовый слиток должен обладать высокой плотностью. Наличие в слитке газоусадочных дефектов (пористости, рыхлот и раковин) приводят к тому, что при обработке давлением они могут раскатываться и вытягиваться. В результате на деформированных полуфабрикатах появляются расслоения, трещины, складки, надрывы и др.

В.И. Напалковым с сотрудниками предлагается [6–9] следующая классификация поверхностных и внутренних дефектов в слитках алюминия и его сплавов:

1. Холодные и горячие трещины, возникновение которых определяется термическими напряжениями из-за температурного градиента в сечении и по высоте слитка, что обусловлено неравномерной кристаллизацией, зависящей от таких технологических параметров как скорость и температура литья, равномерность охлаждения, тепловые условия процесса литья слитков.

2. Поверхностные дефекты, которые можно разделить на следующие подгруппы: оксидные пленки, неслитины, наплывы ликвационные и др. Эти дефекты перед дальнейшим горячим деформированием можно удалить механической обработкой.

3. Дефекты литого металла, обусловленные взаимодействием легирующих компонентов с расплавом алюминия и выделяющиеся в виде интерметаллидов.

4. Дефекты геометрии слитка, обусловленные тепловой асимметрией из-за неоднородного охлаждения периферии слитка, неправильной установки кристаллизатора или поддона, а также неравномерного хода литейной машины.

5. Внутренние дефекты разделяются на две подгруппы - пористость и неметаллические включения. Неметаллические включения бывают в виде твердых включений, шлака, оксидных плен (несущих адсорбированный на них водород), которые заносятся в слиток с поверхности расплава.

Распределение брака по видам представлено на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Виды брака по внутренней структуре для КГПС из алюминиевых сплавов [10]

Следует отметить, что неметаллические включения связаны с технологией металлургического производства, а пористость – главным образом со свойствами металла. Практически все металлы (за исключением галлия, висмута, сурьмы, германия и кремния) при кристаллизации скачкообразно уменьшают свой объем [11, 12]:

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V_T}{V_L} = \beta_{VT} (T_L - T_{KP}), \quad (1.1)$$

где  $\Delta V_T$  – изменение объема расплава при охлаждении его от температуры литья  $T_L$  до температуры кристаллизации  $T_{KP}$ ;  $V_L$  – объема слитка;  $\beta_{VT}$  – коэффициент объемного термического сжатия (расширения).

Поэтому максимальный объем пор, который может возникнуть в отливке будет равен данному изменению объема, который у алюминия составляет  $\varepsilon_V \leq 7,4\%$ . Отливка начинает кристаллизоваться от края к центру: сначала формируется твердая корка, поэтому объем отливки уже не меняется. При затвердевании объем металла уменьшается, и появляется пустое пространство – поры и (или) газо усадочные раковины. Для алюминия и его сплавов таким газом является водород [13 – 16].

Известно, что в процессе кристаллизации растворимость водорода снижается, примерно в 14 раз [12, 16]. Об этом свидетельствует рисунок 1.11.

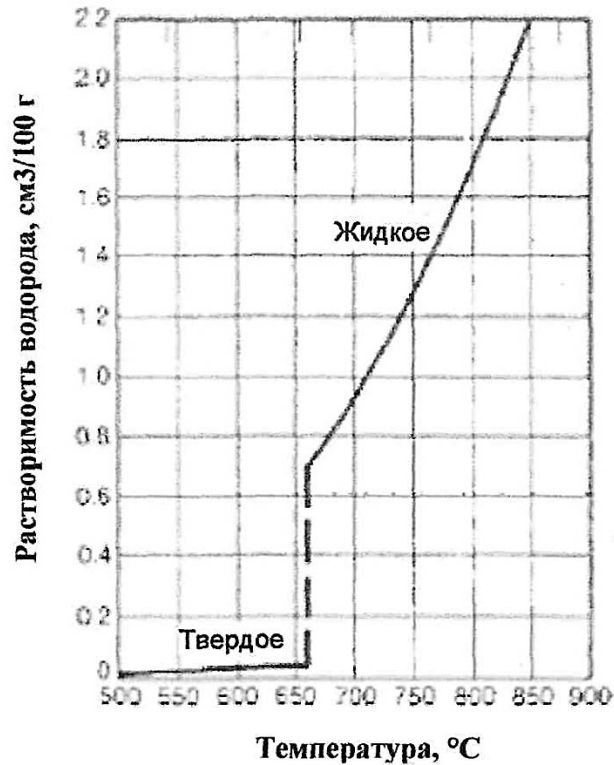


Рисунок 1.11 – Изменение растворимости водорода в алюминии в зависимости от температуры [12, 16]

Основным источником водорода в алюминиевых сплавах являются водяные пары, которые содержатся в шихтовых материалах, во флюсах, в плавильной оснастке, атмосфере плавильного агрегата и т.д. [12, 16].

Содержание водорода в расплаве алюминия обычно составляет в первичном и вторичном алюминии – 0,1...0,3 см³/100 г и 0,4...0,6 см³/100 г расплава соответственно.

Пористость – это дефект внутреннего строения слитка, представляющий собой несплошность, образующуюся от усадки и водорода в алюминиевых слитках.

Свободные полости в твердом металле встречаются в виде [9]:

- а) больших раковин или группы объединенных пор, сосредоточенных в местах отливки, затвердевающих последними;
- б) разбросанных по всему сечению угловатых или округлых раковин и пор;
- в) мелких раковин или пор, связанных между собой и обычно имеющих выход на поверхность (так называемых булавочных уколов);
- г) микропористостей, связанных или разобщенных между собой.



Алюминиевые сплавы склонны к формированию водородной пористости в своей структуре (рисунок 1.12, б). Водород приводит к существенному снижению механических и технологических свойств сплава. Кроме водородной пористости также в сплаве может присутствовать и усадочная (рисунок 1.12, а). Характер и природа образующихся пор не всегда определяется однозначно (рисунок 1.12, в, г).

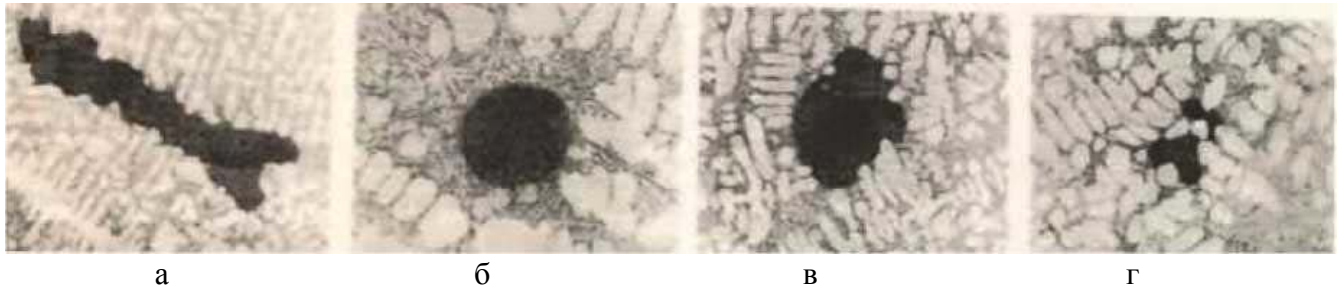


Рисунок 1.12 – Типы пористости в алюминии [9]:  
усадочная (а), водородная (б), смешанной природы (в, г)

Трёхмерное распределение пористости в отливке обычно некачественно воспроизводится на двумерном металлографическом разрезе, взятом для наблюдения под микроскопом. Особенно это касается усадочной пористости. Отдельная усадочная пора будет выглядеть как группа более мелких пор вследствие разреза различных «ветвей» усадочной поры. Одно скопление или «кластер» пор в действительности представляет собой только одну усадочную пору. Газовые поры, которые, как правило, ровностны, не имеют «ветвей» и могут быть найдены как отдельные, изолированные объекты. Таким образом, усадочные поры можно отличить от газовых по расположению относительно других пор. Усадочные поры наблюдаются в виде групп, а газовые поры обнаруживаются в виде изолированных образований [16].

Современные представления об образовании пор объединяют газовую пористость 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 концентрато-

ром напряжения во время протекания процесса усадки, а растягивающие силы, возникающие во время затвердевания, образуют усадочную пору.

Таким образом, пористость в КГПС по ее морфологии можно разбить на следующие виды:

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

- по времени – первичная пористость, которая образуется сразу в объеме слитка во время отливки, и вторичная пористость, которая образуется в твердом слитке после последующей его термомеханической обработки.

Объем первичной пористости линейно возрастает по мере увеличения содержания водорода в расплаве (рисунок 1.13) [16].

Представленная на рисунке 1.13 зависимость пористости слитков сплава АК8, получена для различной скорости кристаллизации и содержания водорода. 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. Критические содержания водорода, ниже которых пористость не образуется, зависят от загрязнения металла окисью алюминия. Если металл не рафинировали от дисперсной взвеси (кривые 1, 2 и 5), то критическое содержание водорода составляет  $0,05 \dots 0,06 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  независимо от скорости охлаждения слитка. Влияние скорости кристаллизации состоит лишь в том, что чем медленнее отводится теплота перегрева и кристаллизации, тем более круто происходит нарастание объема пористости при увеличении содержания водорода. Использование эффективных методов удаления окисных включений затрудняет образование первичной пористости и критические содержания водорода, соответствующие началу образования пористости, увеличиваются (кривые 3 и 4).



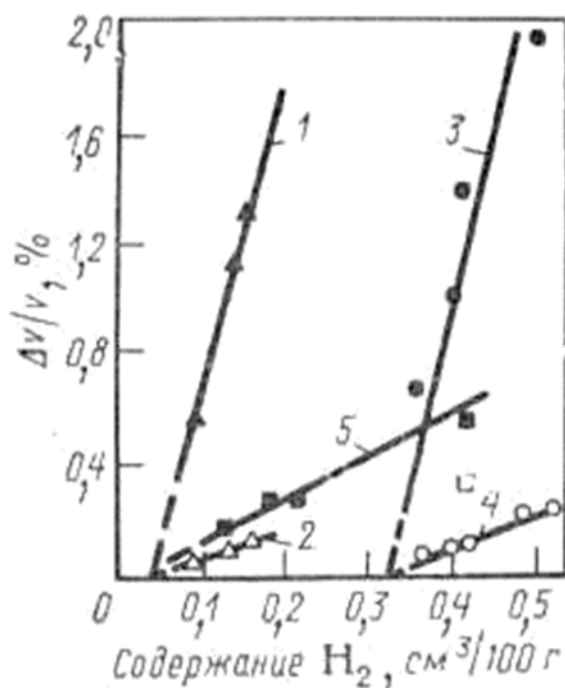


Рисунок 1.13 – Влияние содержания водорода и оксидов на пористость слитков сплава АК8, полученных с различной скоростью кристаллизации: 1–4 – слиток диаметром 90 мм (1, 2 – содержание оксидов 0,01 %, охлаждение в изложнице и водой; 3, 4 – содержание оксидов 0,001%, охлаждение в изложнице и водой); 5 – слиток диаметром 360 мм, охлаждение водой, содержание оксидов 0,01% [12]

А.П. Гудченко и Л.В. Кузьмичевым [12] также было обнаружено, что образование пористости в чистом алюминии марки А99 затруднено и происходит при газосодержаниях более 0,4 см<sup>3</sup>/100 г. В алюминии технической чистоты [12] пористость образуется при содержаниях водорода более 0,1 см<sup>3</sup>/100 г. Это различие в условиях образования пористости связано с меньшим количеством в чистом алюминии твердых неметаллических включений, которые служат центрами зарождения пор. Твердые взвешенные частицы при затвердевании оттесняются фронтом кристаллизации к границам зерен, где и происходит преимущественное образование пористости. Локализация пор по границам зерен обусловлена не только сегрегацией в межзеренных прослойках взвеси твердых включений, но и перераспределением водорода при кристаллизации [17].

Величина усадки зависит от природы затвердевающего металла и ее невозможно избежать. Так при полунепрерывном литье КГПС усадочная раковина располагается в верхней части слитка – в литнике. Во время литья данная область слитка постоянно пополняется свежими порциями жидкого металла. После окончания литья и остывания слитка литник вместе с усадочной раковиной удаляют.

В исследованиях [12, 16, 18] с применением термодинамических расчетов предложен механизм влияния водорода на формирование структуры слитков из алюминия и его сплавов при затвердевании.

При кристаллизации слитков получают пересыщенные растворы водорода в твердом металле. Такое состояние неустойчивое и при последующей выдержке в области достаточно высоких температур должны наблюдаться процессы распада. При отжиге слитков алюминия водород из пересыщенного раствора выделяется в молекулярной форме, образуя поры с высоким внутренним давлением [12]. Авторами работы [12] эта мелкая пористость (диаметром 1...40 мкм) была названа вторичной пористостью в отличие от первичных газовых пор, развивающихся в процессе кристаллизации. Вторичная пористость развивается при отжиге крупных слитков алюминия различной чистоты, содержащих 0,1...0,4 см<sup>3</sup> водорода в 100 г металла.

Подробное экспериментальное изучение вторичной пористости в алюминии повышенной чистоты и техническом алюминии было проведено [12] на слитках диаметром 60 мм, полученных методом непрерывного литья. Величину пористости оценивали как отношение разности теоретической и действительной плотностей к теоретической плотности.

Металлографические исследования показали, что в алюминии повышенной чистоты пористость располагается по границам зерен. Нередко образуется сплошная цепочка пор, приводящая к образованию при определенных условиях расслоений (несплошностей) по границам зерен и к вспучиванию металла на поверхности, что наблюдалось при отжиге анодированных образцов с газосодержанием 0,75 см<sup>3</sup>/100 г. Одновременно указывается, что в техническом алюминии объем вторичной пористости неизменно ниже и редко превышает 0,15%. При

этом поры располагаются внутри зерна. Отмечается также, что вторичная пористость в алюминии повышенной чистоты появляется при значительно более низких газосодержаниях расплава ( $0,13 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ), чем в техническом алюминии ( $0,18 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ). Существенное значение при образовании вторичной пористости оказывают окисные включения, которые являются потенциальными местами образования зародышей пор (рисунок 1.14).

В работе [12] была предложена гипотеза, объясняющая кинетику роста пор. Принималось, что рост пор связан с распадом пересыщенного раствора водорода в металле, причем скорость процесса роста пор лимитируется диффузией растворенного газа к поверхности пор. По мнению автора работы [12], рост пористости происходит только в том случае, если концентрация водорода, растворенного в металле, превышает величину растворимости, соответствующую данной температуре и критическому давлению газа в порах. Критическое давление, превышение которого приводит к росту пор, в свою очередь связано с механическими свойствами металла при температуре отжига.

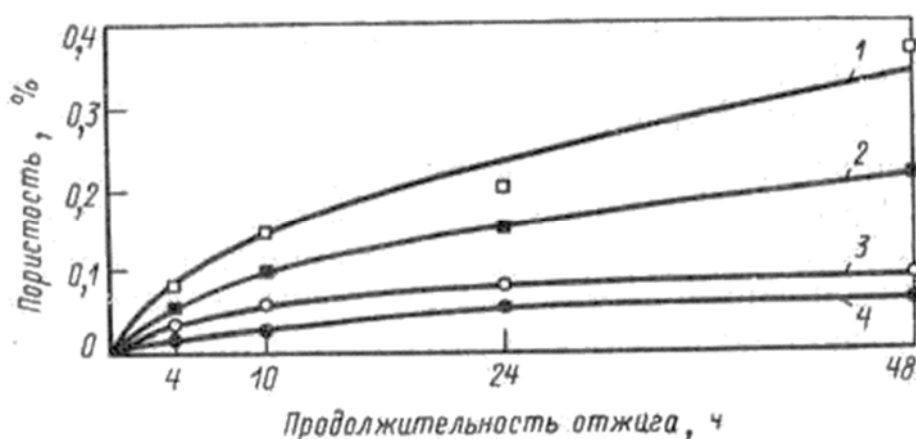


Рисунок 1.14 – Зависимость объема вторичной пористости ( $\text{см}^3/100 \text{ г}$ ) от газосодержания и длительности, отжига в алюминии повышенной чистоты: 1 – 0,75; 2 – 0,39; 3 – 0,2; 4 – 0,1 [12]

Задача распределения водорода в системе, состоящей из двух фаз – в порах и в твердом растворе, была решена в работах [17, 19]:

$$C_{\Sigma} = C_p + \frac{M \cdot \Delta V \cdot C_p^2}{K^2 RT \exp(\Delta H/RT)}, \quad (1.2)$$

где  $\Delta V$  – общий объем пор;

$V$  – объем и  $T$  температуры металла;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$M$  – молекулярная масса водорода;

$\Delta H$  – энтальпия;

$C_{\Sigma}$  и  $C_p$  – средняя и в твердом растворе концентрации водорода.

Из анализа уравнения (1.2) следует, что с изменением температуры соотношение масс водорода в различных состояниях меняется по-разному в зависимости от знака величины  $\Delta H$ . Для эндотермических окклюдеров ( $\Delta H > 0$ ), к которым относится и алюминий, с увеличением температуры доля водорода в порах уменьшается, для экзотермических ( $\Delta H < 0$ ) увеличивается. С возрастанием средней концентрации водорода в металле доля его в порах резко увеличивается. На рисунках 1.15 и 1.16 приведены рассчитанные по уравнению (1.2) зависимости.

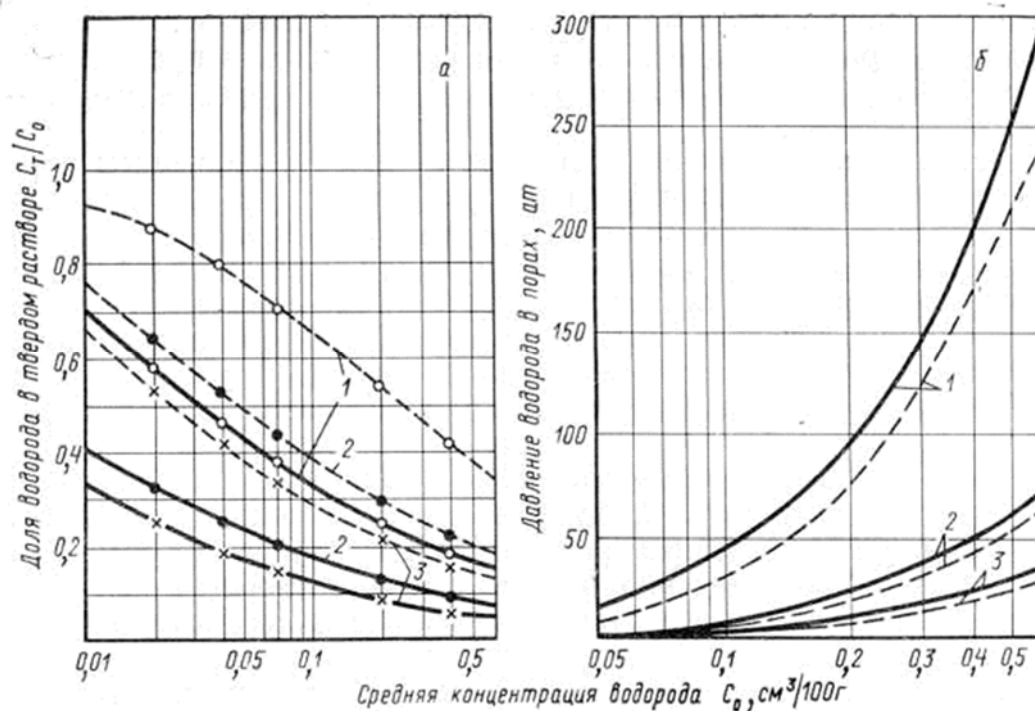


Рисунок 1.15 – Распределение водорода в алюминии (а) и равновесные давления водорода в порах (б) при температурах 400°С (сплошные линии) и 500°С (пунктирные линии). Относительная пористость: 1 –  $10^{-4}$ ; 2 –  $5 \cdot 10^{-4}$ ; 3 –  $10^{-3}$  [12]

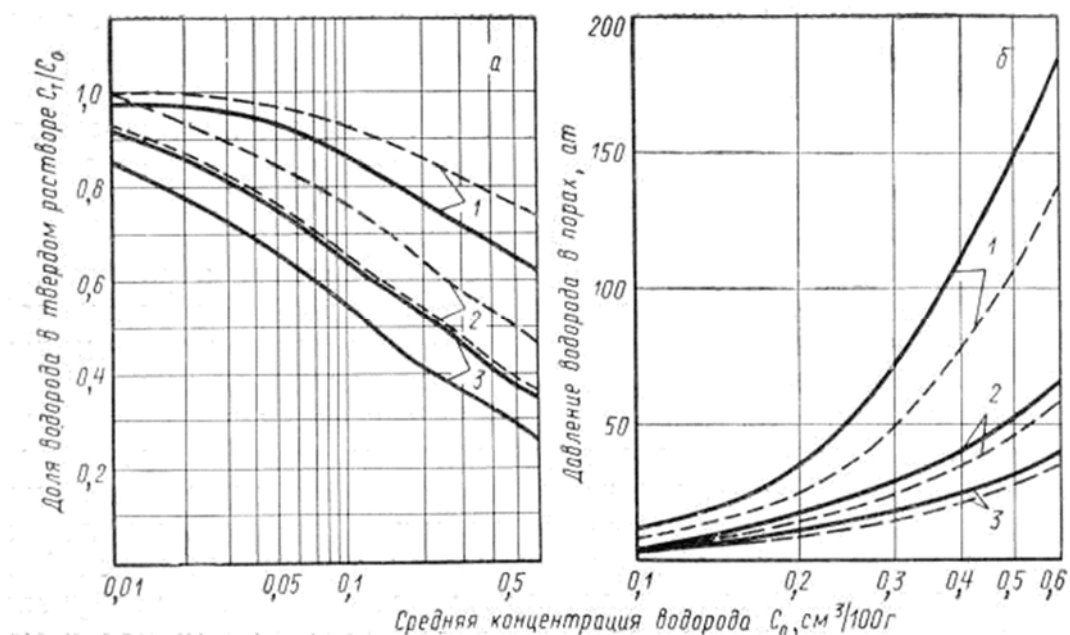


Рисунок 1.16 — Распределение водорода в алюминии (а) и равновесные давления водорода в порах (б) при температурах 600°C (сплошные линии) и 660°C (пунктирные линии).

Относительная пористость: 1 —  $10^{-4}$ ; 2 —  $5 \cdot 10^{-4}$ ; 3 —  $10^{-3}$  [12]

Значения  $K$  и  $\Delta H$  приняты по данным работы [12]. Из приведенных данных видно, что распределение водорода между твердым раствором и порами существенно различается при различных температурах. При температуре 400 °C большая часть водорода находится в порах при всех реально встречающихся концентрациях в интервале значений относительной пористости в пределах от 0,01 до 0,1%. При повышении температуры до 500°C доля водорода в твердом растворе несколько возрастает, но даже при относительной пористости 0,01% она не превышает 50% для концентраций водорода выше  $0,2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Дальнейшее повышение температуры способствует дальнейшему переходу водорода в твердый раствор, но и при температуре плавления 660 °C значительная часть водорода продолжает оставаться в порах. Описанное выше распределение водорода между порами и твердым раствором имеет место в условиях термодинамического равновесия, которое в реальных условиях это равновесие наступает с достаточно большой скоростью.

Разные способы обработки расплавов рафинированием и дегазацией от водорода, приводящие к его удалению с границ раздела основных фаз, довольно

успешно способствует ускорению процесса кристаллизации и в ряде случаев модифицируют структуру слитков [6-8, 13, 20-23]. Для обеспечения качества получаемых слитков регламентируемое содержание водорода в расплаве алюминия должно составлять до  $0,10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  [24-26].

Большое влияние на растворимость водорода в расплаве алюминия и на образование пористости при затвердевании оказывают легирующие элементы из состава сплава [27, 28]. Так, достаточно сильно растворимость водорода в твердом алюминии наблюдается при повышенном содержании магния. Согласно [27], повышенная растворимость выявлена в соединении  $Mg_2Al_3$  ( $1,45$  и  $5,9 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  при температуре плавления для твердого и жидкого состояния соответственно). Согласно рисунку 1.17, добавка в расплав алюминия  $1 \div 6\% \text{ Mg}$  приводит к тому, что растворимость водорода увеличивается с монотонным характером; однако при добавке в этот же расплав  $0,9 \div 0,2\% \text{ Si}$  растворимость водорода уменьшается (рисунок 1.17).

В настоящее время установлено [24, 25, 28], что введение в расплав алюминия компонентов с повышенной способностью растворять водород приводит к повышенной растворимости водорода в расплаве.

Интервал кристаллизации в алюминиевых сплавах 5XXX серии увеличивается от  $10$  до  $49 \text{ }^\circ\text{C}$  при увеличении содержания магния в сплаве от  $2$  до  $6$  масс. %; это способствует росту двухфазной зоны при затвердевании отливки и увеличению объема усадки, который приходится на поры [10, 25, 29–32].

Усадочная пористость, в основном, зависит от формы и размера переходной зоны, а именно, от длины каналов, осуществляющих питание усадки [1, 9, 15]. При этом структура переходной зоны также играет определенную роль. По всей вероятности, перемещение расплава по прямым внутридендритным каналам в процессе столбчатой кристаллизации происходит гораздо легче по сравнению с перемещением по внутридендритным каналам равноосных зерен, имеющих извилистый характер. Собственно, все причины, приводящие к расширению переходной зоны, способствуют увеличению усадочной пористости. То есть, увеличение температурного интервала кристаллизации сплава приводит к возрастанию пори-

стости. Но если температурные градиенты в слитке достаточно большие, то пористость уменьшается. Достаточно эффективным способом устранения усадочной пористости может являться увеличение интенсивности охлаждения слитков в технологических условиях [1, 9, 12, 33, 34].

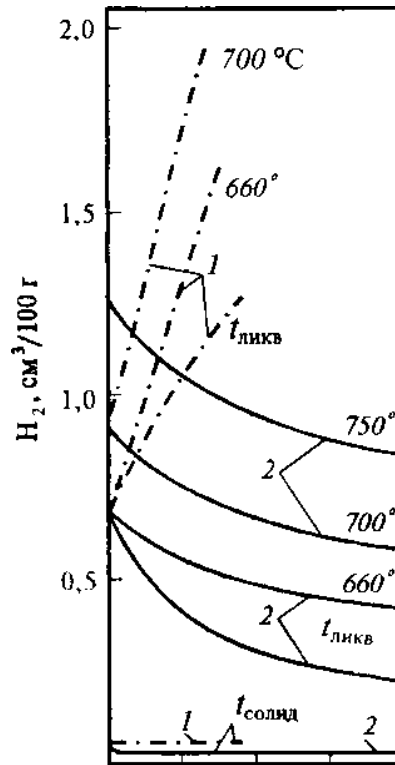


Рисунок 1.17 – Влияние содержания  $Mg$  (1) и  $Si$  (2) на растворимость водорода в жидком алюминии [12]

Согласно вышесказанному, особо следует выделить [12, 35]:

1. Пористость дендритного характера, определяемая, в основном, невосполненной усадкой в процессе кристаллизации.
2. Пористость больше определяется размерами и формой переходной области в слитке, а не скоростью кристаллизации. Обратная зависимость пористости от скорости кристаллизации определяется тогда, когда последняя изменяется вследствие изменения температурного градиента у поверхности кристаллизации.
3. Пористость дендритного характера в слитках, полученных методом непрерывного литья, присутствует, как правило, в их центральных зонах. Обычно можно наблюдать увеличение пористости в направлении к тепловому центру

слитка. Объяснить это можно, исходя из того, что переходная зона в некоторой степени расширяется в процессе движения фронта кристаллизации слитка. Также это может быть связано с отсутствием так называемого «свободного» расплава на последней стадии затвердевания слитка.

Следующей проблемой, с которой сталкиваются при производстве слитков, является зональная ликвация [1]. При зональной ликвации химический состав сплава в горизонтальном сечении слитка разный. При этом зональную ликвацию называют прямой или обратной в зависимости от характера распределения ликвирующих компонентов в сплаве (рисунок 1.18).

Согласно рисунку 1.19 [36], это выражается в том, что происходит обогащение периферийных слоев теми элементами, которые образуют легкоплавкие структурные составляющие, а именно – кремнием, медью и магнием [36].

Увеличение скорости литья слитков изготовленных методом полунепрерывного литья, при всех одинаковых условиях процесса, приводит к увеличению эффекта зональной ликвации, что следует из рисунка 1.20.

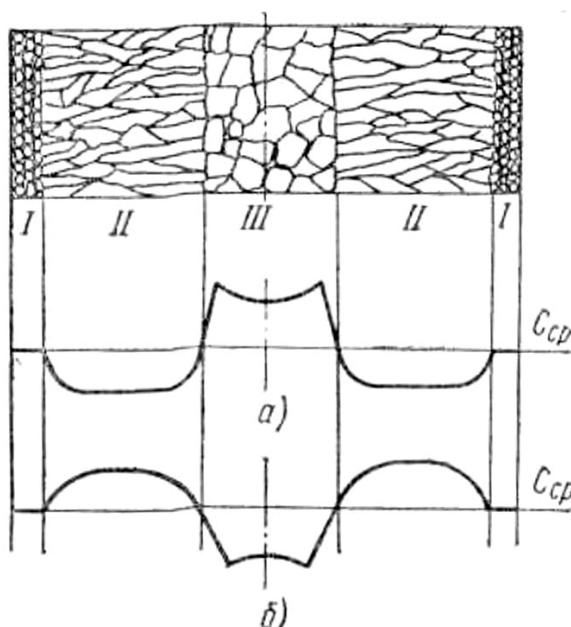


Рисунок 1.18 – Распределение ликвирующих элементов в зонах отливки при развитии прямой (а) и обратной (б) зональной ликвации ( $C_{cp}$  – концентрация ликвирующего элемента в исходном сплаве) [12]



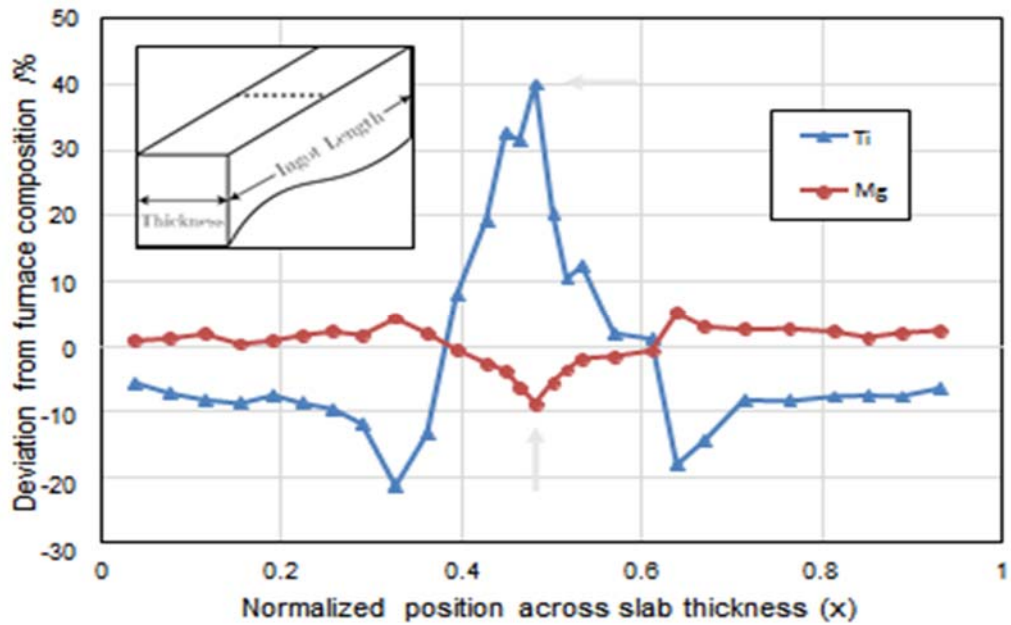


Рисунок 1.19 – Зональная ликвация магния и титана по ширине КГПС, изготовленных методом полунепрерывного литья [36]

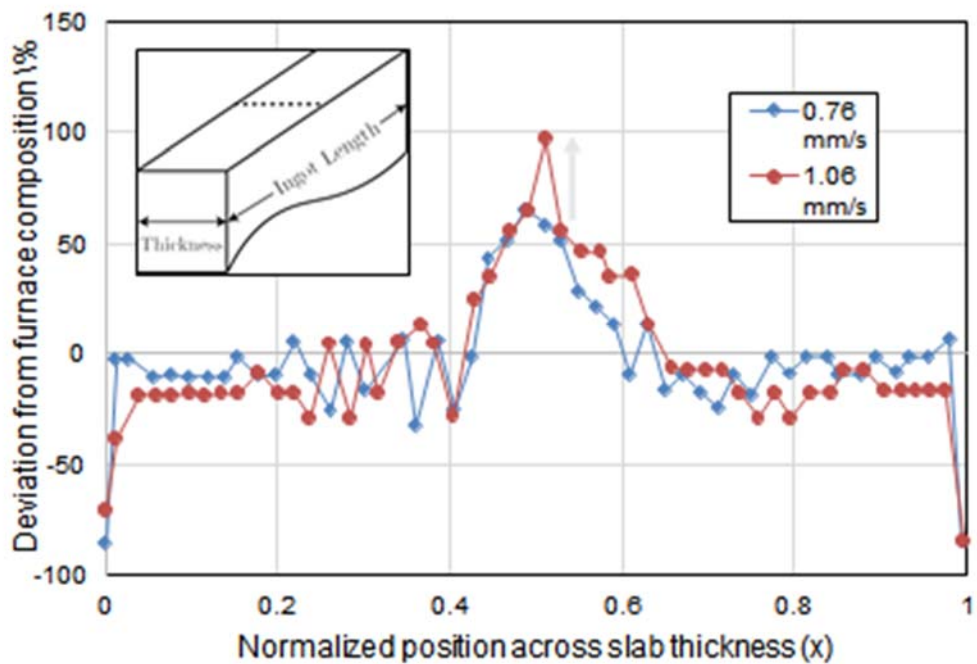


Рисунок 1.20 – Влияние скорости литья на зональную ликвацию титана по ширине КГПС, изготовленных методом полунепрерывного литья [36]

Если принять во внимание, что концентрация в сплаве магния и титана значительно влияет на растворимость водорода, и как следствие, на образование по-

ристости, то их изменение в общем объеме слитка также вызовет и перераспределение пористости.

Получение слитков требуемого качества из алюминия с регламентируемым содержанием пористости проф. Напалковым В.И. с сотрудниками и рядом других исследователей определены [6–9, 20, 21, 27, 37–39] обязательные для соблюдения некоторые условия (здесь они указаны в комплексе):

1. Концентрация железа должна быть больше на 0,02...0,05 масс. % и примерно в 1,2...1,5 раза превышать концентрацию в сплаве кремния. Это способствует уменьшению горячеломкости сплава, а также при проведении рекристаллизационного отжига уменьшает склонность зерна к росту; при этом в холодном состоянии наблюдается повышение пластичности и увеличивается изотропность свойств сплава в слитке.

2. Необходимо в расплав добавлять около 0,02 масс. % Ti с помощью лигатуры «Алюминий–титан» и 0,005 масс. % Ti с помощью лигатурного прутка Al–5Ti–B.

3. Концентрация марганца в сплаве не должна быть 0,03 масс. %; это обусловлено тем, что большие концентрации этого элемента приводят при рекристаллизационном отжиге к аномальному росту зерна.

4. Расплав необходимо подвергать фильтрации.

5. Расплав необходимо дегазировать (с целью снижения содержания водорода до 0,10 см<sup>3</sup>/100 г (для того, чтобы после отжига нивелировать образование пористости)).

К увеличению пористости в слитках может приводить повышение температуры литья более регламентируемой.

Температура расплава при литье круглых слитков должна быть на 50...100°C, а при литье плоских слитков на 40...80°C выше температуры ликвидуса сплава [1, 12, 25]. Рекомендуемый режим литья для сплавов 5XXX серии составляет: температура литья около 695...720°C; скорость литья около 5,4...6,6 м/ч [1, 12, 25].

Многочисленные результаты исследований в области структуры, пористости и различных свойств алюминиевых сплавов (в том числе и 5XXX серии), приведенные в работах [40–76], подтверждают выше отмеченные закономерности.

### **1.3 Предпосылки использования компьютерного моделирования процесса полунепрерывного литья**

Получаемая структура в слитках из алюминиевых сплавов может зависеть от целого ряда технологических факторов. Основными факторами можно считать следующие [6, 7, 12, 25, 34]:

- химический состав получаемого сплава;
- наличие в сплаве специально введенных примесных элементов-модификаторов или инокулирующих добавок, наличие неконтролируемых примесей, введенных с шихтовыми материалами;
- перегрев и выдержка расплава;
- температура литья и скорость кристаллизации расплава;
- высота кристаллизатора.

Хорошо известно, что некоторые из указанных факторов можно весьма точно оценить, так как влияние их на процесс достаточно определено. Некоторые же из данных факторов оказывают прямое или косвенное влияние на параметры кристаллизации сплавов, которые можно оценивать всего лишь качественно.

Технологических факторов достаточно много, и, к сожалению, это не позволяет определить какую-либо общую конкретную связь между параметрами кристаллизации слитка и пористостью в нем. Процессы полунепрерывного литья наиболее широко рассматриваются в работах В.И. Добаткина и В.И. Напалкова с соавторами [1, 6, 9, 12, 13]. При этом отмечено отсутствие общепринятых методик количественной оценки пористости в слитках.

Имеющиеся сведения по количественному анализу исследования пористости в объеме слитков и разработке эффективной технологии изготовления слитков с регламентируемым размером пор в доступной научной литературе весьма отрывочны.

При всем вышесказанном, методы экспериментального исследования процессов литья требуют изготовления технологического инструмента, оснастки, экспериментальных приборов и установок, позволяющих получать воспроизводимые научные результаты. Данные исследования требуют существенных материальных затрат.

Исходя из вышесказанного, а также из интенсивного развития перспективных цифровых технологий в различных областях науки и техники, довольно широкое применение в области развития и усовершенствования литейных процессов распространяется компьютерное моделирование [77–88].

Для анализа литейных процессов наибольшее развитие получают компьютерные модели, основанные на ProCAST - профессиональной системе компьютерного 3D-моделирования литейных процессов методом конечных элементов [5].

Использование существующего компьютерного моделирования для совершенствования процессов полунепрерывного литья и исследования кристаллизации «КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии» дает возможность прогнозировать структуру получаемого слитка, формирование пористости и других литейных дефектов в слитке, а также с целью повышения качества слитков проводить оптимизацию существующих технологических и конструктивных параметров полунепрерывного литья [10].

#### **1.4 Выводы по главе и постановка цели и задач исследования**

1. КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии являются одним из востребованных продуктов ОК РУСАЛа на рынке потребления.

2. Установлено, что среди основных требований к качеству КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии является регламентированная пористость в объеме слитка.

3. Установлены следующие особенности морфологии пористости в объеме КГПС:

- объем первичной пористости возрастает по мере увеличения размера зерна и содержания водорода в расплаве и находится в обратной зависимости от скорости кристаллизации;

- при снижении содержания водорода в расплаве менее  $0,10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  сплава практически отсутствует первичная газовая пористость;

- с увеличением содержания магния увеличивается рассеянная пористость;

- распространение рассеянной пористости увеличивается по направлению к центру отливки.

4. Для моделирования морфологии пористости в объеме КГПС во время полунепрерывного литья и кристаллизации слитков из алюминиевых сплавов наиболее эффективно применение программного комплекса ProCAST.

Целью настоящей работы являлось исследование технологических процессов изготовления КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии методом полунепрерывного литья и разработка технических и технологических решений, обеспечивающих снижение пористости в объеме слитка.

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;

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  $60 \text{ мкм}$  в объеме слитка.

## ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе представлены использованные методики проведения исследований.

Эксперименты проводились в лабораторных и промышленных условиях [10, 89, 90].

### 2.1 Методика определения пористости в объеме КГПС

Общепринятых методик количественной оценки пористости в настоящее время нет. Как правило, объем усадочных раковин определяют, заливая их жидкостью. Суммарный объем рассеянных пор в слитке определяют, сопоставляя плотности вырезанных из него образцов до и после всестороннего сжатия:

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V_{II}}{V_C} = \frac{\rho_D - \rho_{II}}{\rho_D}, \quad (2.1)$$

где  $\Delta V_{II}$  - изменение пор;

$V_C$  - объема слитка;

$\rho_{II}$  и  $\rho_D$  - плотности вырезанных из слитка образцов до и после всестороннего сжатия.

Для качественной оценки пористости отливок из алюминиевых сплавов ВИАМом была предложена пятибалльная шкала пористости (согласно ГОСТ 1583 - 93) [91].

Степень пористости макрошлифов в баллах устанавливают по пятибалльной шкале (рисунок 2.1)

Степень пористости макрошлифов в баллах устанавливают сравнением их с эталонами шкалы: балл 1 – мелкая пористость; балл 2 – пониженная пористость; балл 3 – средняя пористость; балл 4 – повышенная пористость; балл 5 – высокая пористость [91].

И.Ф. Колобневым и М.Б. Альтманом была предложена пятибалльная шкала для количественной оценки пористости (таблица 2.1) [12].

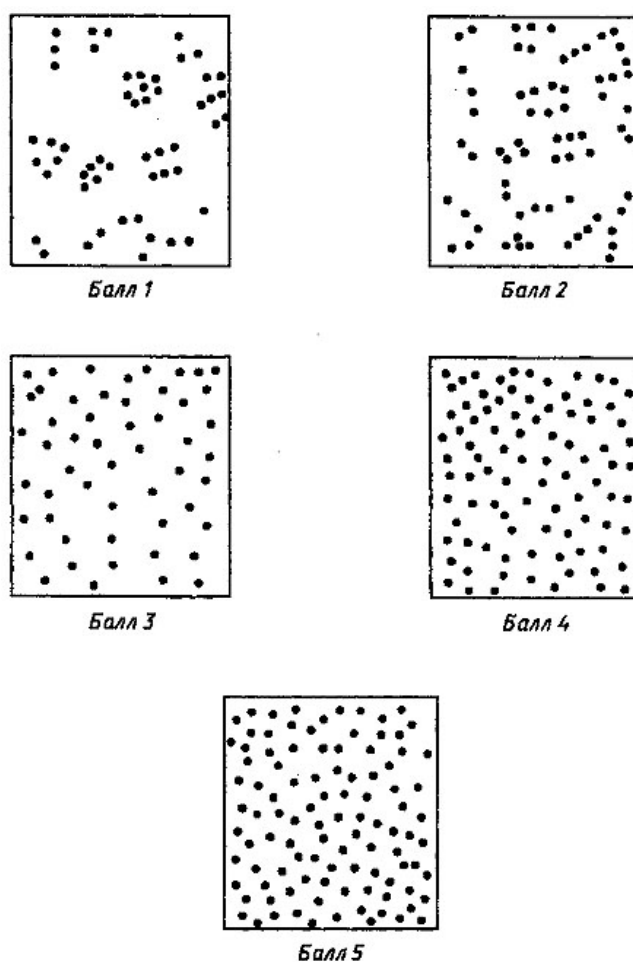


Рисунок 2.1 – Шкала пористости алюминиевых сплавов [91]

Таблица 2.1 – Шкала для количественной оценки пористости

Балл пористости	Число пор на 1 см <sup>2</sup>	Диаметр пор, мм	Количество пор, %
1	<5	<0,1	90
		<0,2	10
2	<10	<0,1	80
		<0,2	20
3	<15	<0,3	80
		<0,5	20
4	<20	<0,5	70
		<1,0	30
5	<25	<0,5	60
		<1,0	30
		1,0>	10

Параметры пористости темплетов слитка определяются по трем квадратам площадью 1 см<sup>2</sup> каждый (схема приведена на рисунке 2.2) [91]. Количество пор и размер пор определяют как среднее арифметическое трех измерений. При наличии отклонений по среднему количеству, размеру или процентному содержанию

пор в сторону увеличения показателя пористости относят к более высокому баллу пористости. Соответственно, точность оценки носит весьма субъективный характер, и здесь большое значение играет квалификация исследователя.

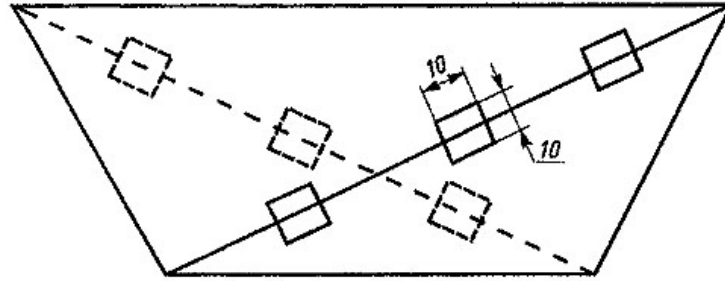


Рисунок 2.2 – Схема расположения квадратов на микрошлифе, используемая для оценки параметров пористости

На основе известных методик качественной оценки пористости была разработана методика количественной оценки пористости для КГПС металлографическим методом [10], согласованная с зарубежными потребителями данной продукции. Отбор темплетов от КГПС проводился по схеме, приведенной на рисунке 2.3.

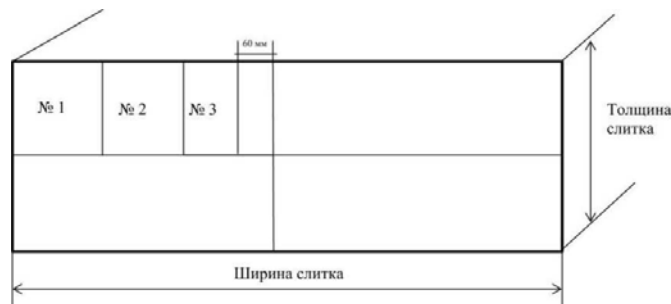


Рисунок 2.3 – Схема отбора темплетов

Далее проводился отбор образцов от темплетов по схеме, приведенной на рисунке 2.4.

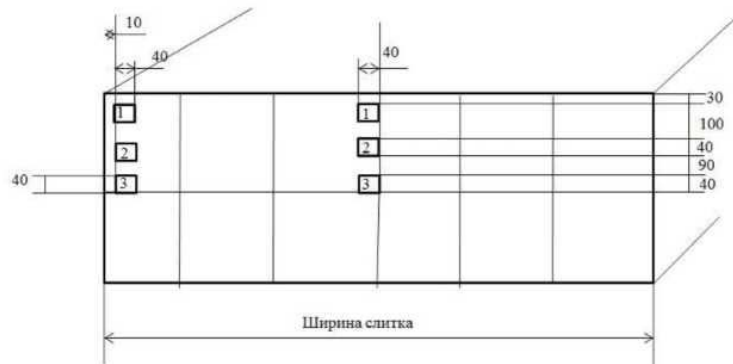


Рисунок 2.4 – Схема отбора образцов от темплетов



В настоящей работе исследования проводили с помощью инвертированного металлографического микроскопа марки OLYMPUS GX71/GX51 и с применением программного комплекса для металлографического анализа Thixomet.PRO с учетом требований СТО 04.02.040-2017 «Определение параметров пористости металлографическим методом». Размер единичных пор и очагов пористости оценивали на площади микрошлифов  $4 \text{ см}^2$ , а объемную долю пор оценивали на площади  $1 \text{ см}^2$ . Отбор фрагментов от темплета для подготовки микрошлифов осуществляют с помощью абразивного отрезного станка с охлаждением СОЖ для предотвращения сильного окисления поверхности (прижогов). Рекомендуемый размер фрагментов -  $20 \times 20 \times 7 \text{ мм}$  (ДхШхВ). В настоящей работе шлифы изготавливали на автоматизированных шлифовально-полировальных станках Saphir 520 (Germany) с использованием расходных материалов фирмы Lam Plan (France).

Характерная микроструктура слитков с одиночными порами и очагами пор представлена рисунке 2.5.

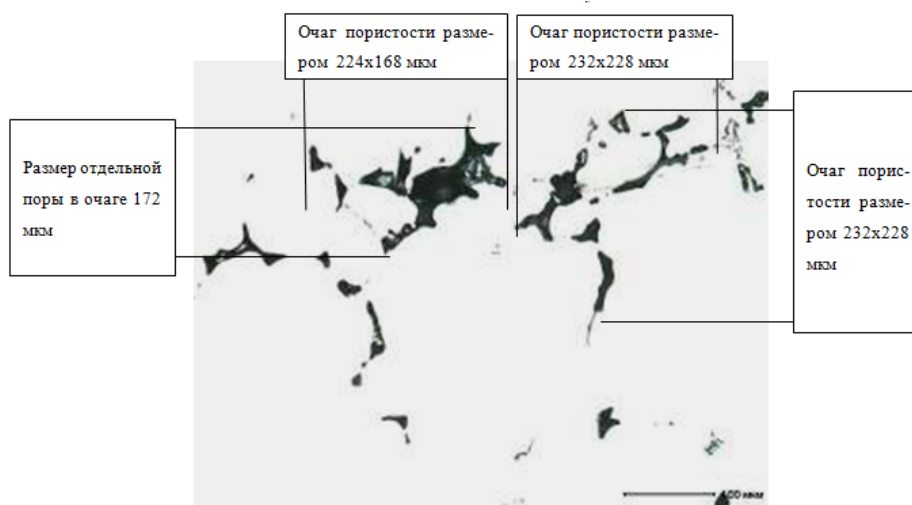


Рисунок 2.5 – Микроструктура слитков с одиночными порами и очагами пор

На рисунке 2.6 показаны типичные поры после литья для сплавов 5XXX серии.

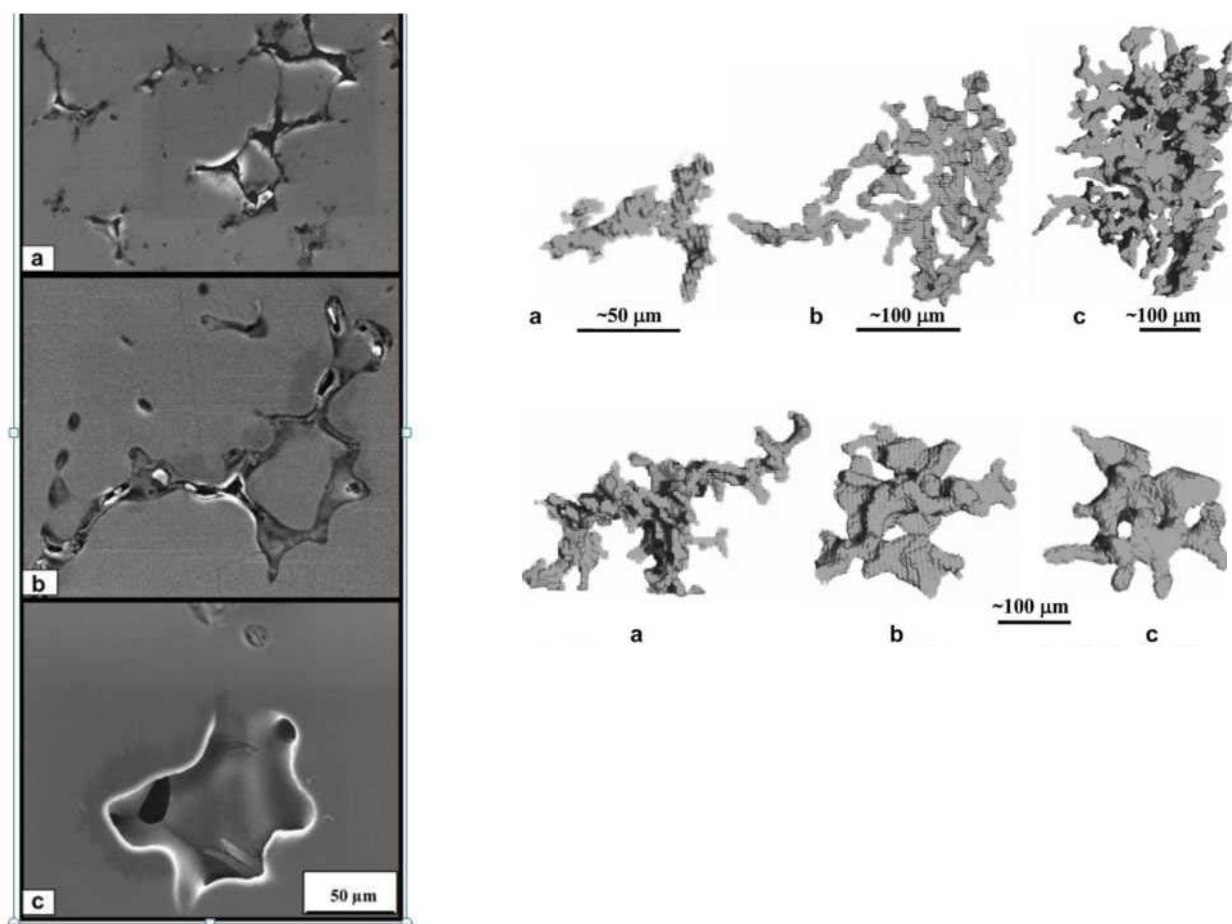


Рисунок 2.6 – Морфология пор отдельных пор после литья для сплавов 5XXX серии:

(a) Al-2Mg, (b) Al-4Mg и (c) Al-6Mg

~200 мм, 3~300 мм, 4~центр, 5~100 мм, 6 ~30 мм [91]

Перед проведением измерений параметров пористости необходимо просмотреть всю поверхность анализируемого микрошлифа с целью нахождения максимально дефектной зоны. В программе создается панорамное изображение площадью  $1 \text{ см}^2$ , включающее максимально дефектную зону. Максимальный и минимальный линейный размер пор определяются по диаметру Фере –  $F_1$  и  $F_2$ .

Для определения размера отдельных пор на панорамном изображении при помощи программного обеспечения выделяются поры с максимальным линейным размером  $F_1$  более 60 мкм. Поры  $< 60$  мкм исключают из анализа (рисунок 2.7).

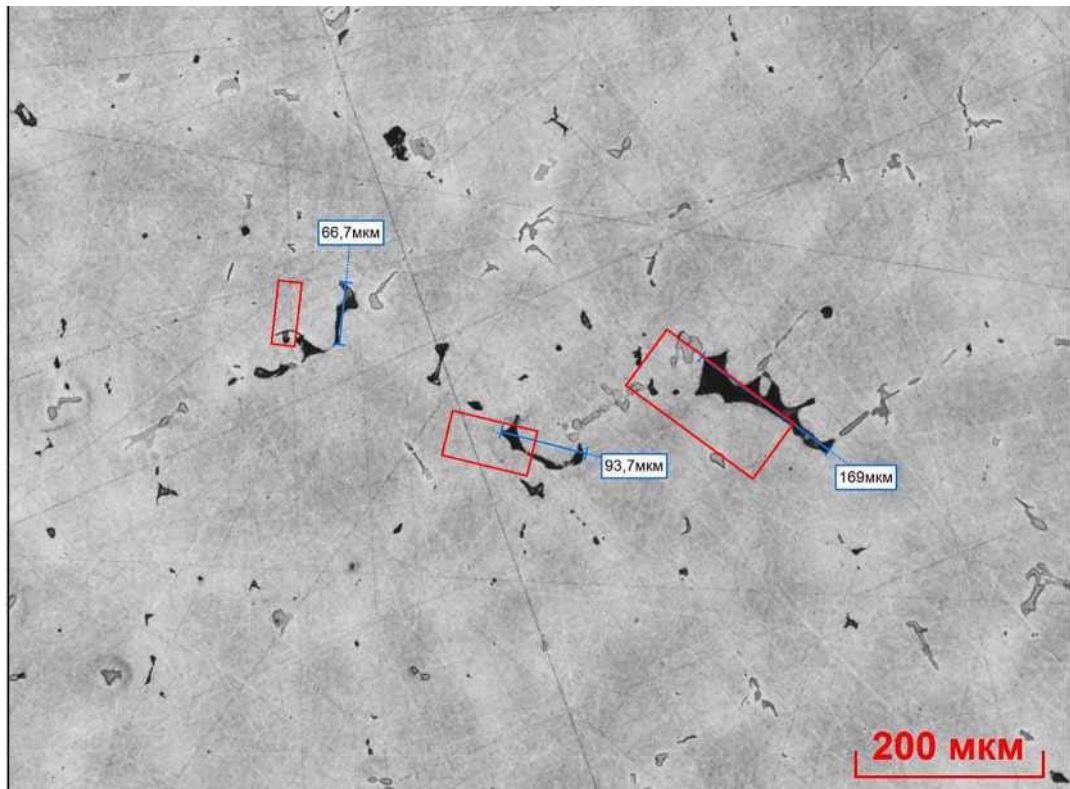


Рисунок 2.7 – Микроструктура слитков с одиночными порами и очагами пор

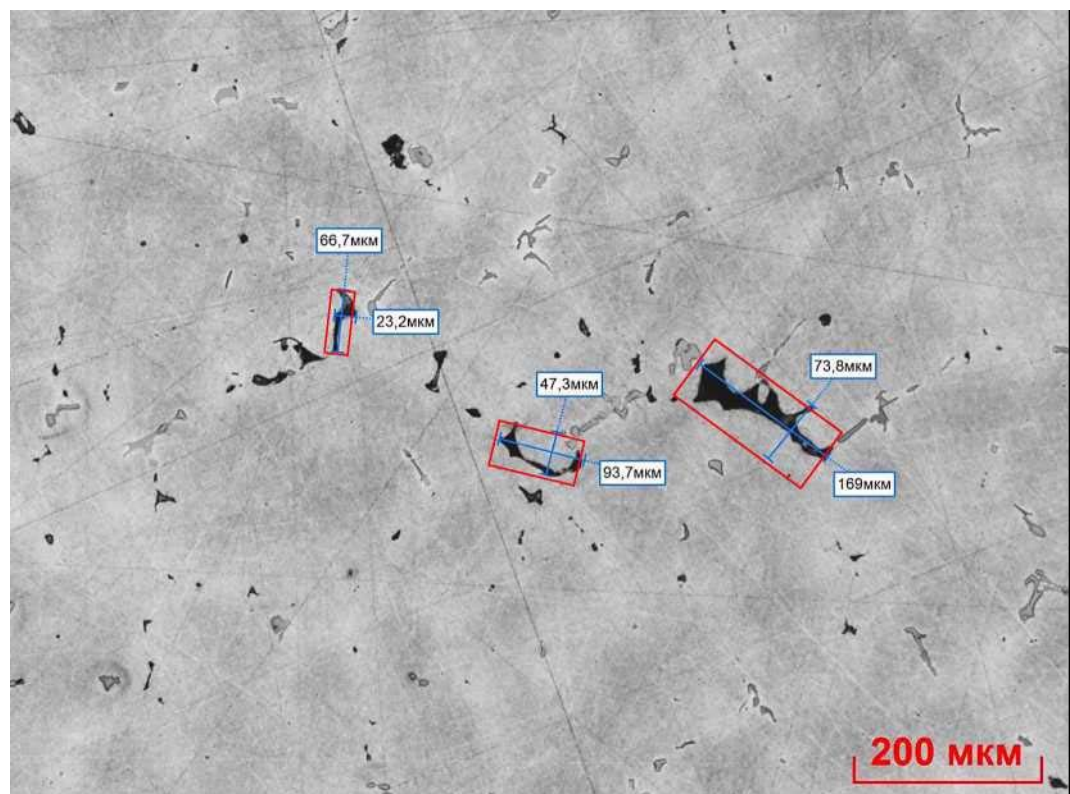


Рисунок 2.8 – Максимальный  $F_1$  и минимальный  $F_2$  линейный размер пор

Для определения среднего размера каждой отдельной поры определяют ее максимальный и минимальный линейный размер ( $F_1$  и  $F_2$ ) (рисунок 2.8). За размер поры принимают среднее арифметическое значение линейных размеров:

$$d = \frac{F_1 + F_2}{2}, \quad (2.2)$$

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) принимают среднее арифметическое значение всех проанализированных отдельных пор по формуле:

$$D_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \quad (2.3)$$

где  $D_{CP}$  – средний размер пор на фрагменте;

$d_i$  – средний размер отдельной поры;

$n$  – количество пор на фрагменте.

Результатом анализа размера пор на слитке считают среднее значение размера пор по двум фрагментам:

$$D = \frac{D_{CP1} + D_{CP2}}{2}, \quad (2.4)$$

где:  $D_{CP1}$  и  $D_{CP2}$  – средний размер пор на 1 и 2 фрагментах соответственно;

$D$  – среднее значение размера пор по двум фрагментам.

Если на одном из фрагментов не обнаружены поры с максимальным линейным размером более 60 мкм, за результаты анализа принимается средний размер пор на одном фрагменте.

Для определения размера очагов пор на панорамном изображении при помощи программного обеспечения выделяются очаги (скопления) пор с максимальным линейным размером  $F_1$  более 300 мкм. Очаги пор менее 300 мкм исключают из анализа (рисунок 2.9).



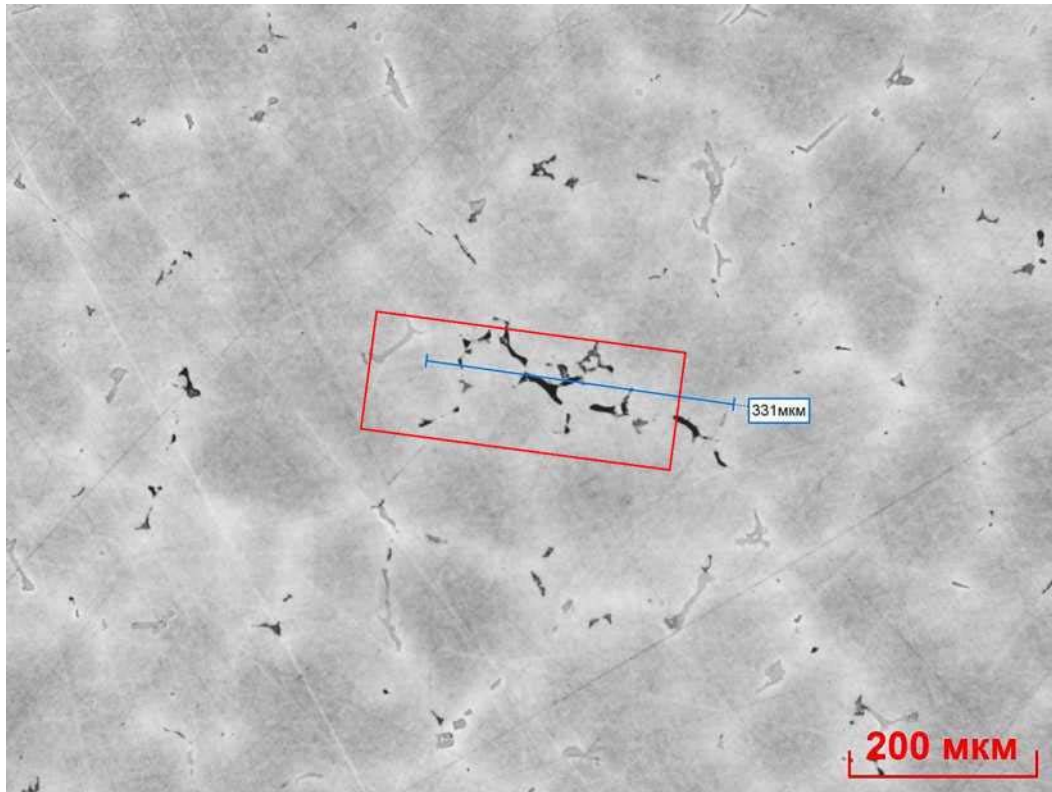


Рисунок 2.9 – Выделенные очаги (скопления) пор с  $F_1$  более 300 мкм

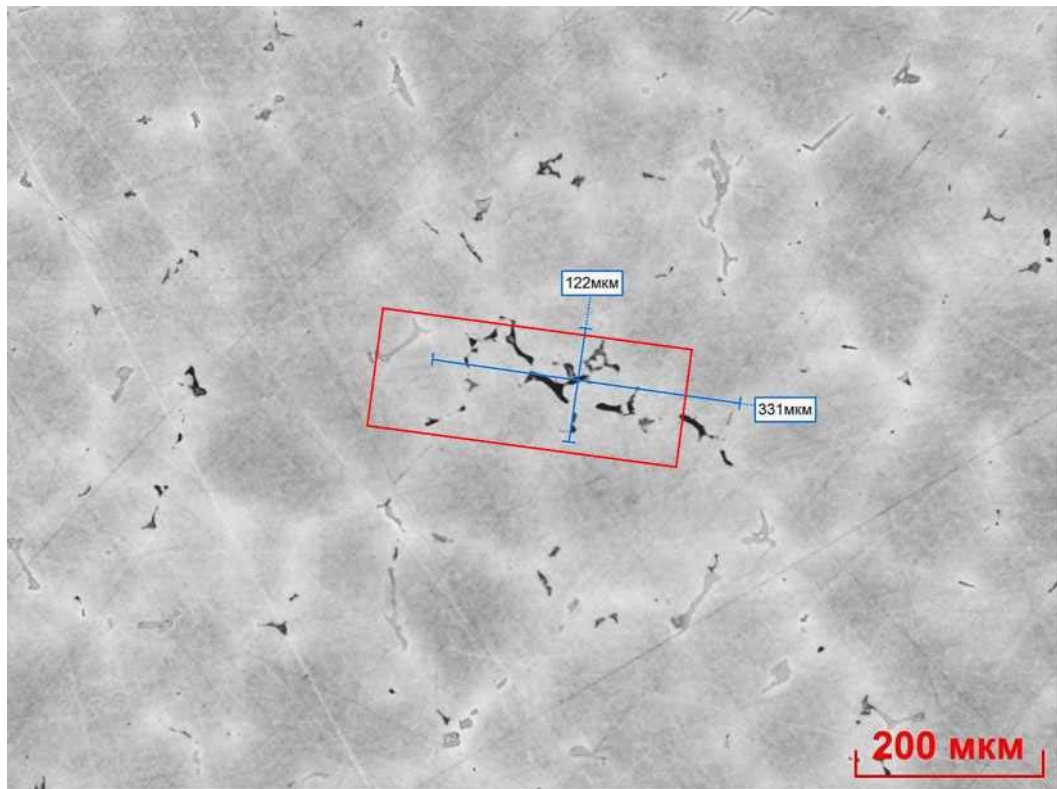


Рисунок 2.10 – Максимальный  $F_1$  и минимальный  $F_2$  линейный размер очага пор

Для определения среднего размера каждого очага (скопления двух и более пор, находящихся на расстоянии менее 20 мкм друг от друга) пор определяют его максимальный и минимальный линейный размер ( $F_1$  и  $F_2$ ) (рисунок 2.10).

За размер очагов пор принимают среднее арифметическое значение линейных размеров отдельного очага пор:

$$d_{оп} = \frac{F_1 + F_2}{2}, \quad (2.5)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – максимальный и минимальный диаметры Фере соответственно;

$d_{оп}$  – средний размер отдельного очага пор.

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

$$D_{CP}^{оп} = \frac{\sum_{i=1}^n d_{опi}}{n}, \quad (2.6)$$

где  $D_{CP}^{оп}$  – средний размер пор на фрагменте;

$d_{опi}$  – средний размер отдельного очага поры;

$n$  – количество очагов пор на фрагменте.

Если на одном из фрагментов не обнаружены очаги (скопления) пор с максимальным линейным размером более 300 мкм, за результаты анализа принимается средний размер очага пор на одном фрагменте. Результаты оценки параметров пористости вносят в таблицу протокола и при необходимости делают фотографии микропористости в структуре КГПС.

## 2.2 Плавка сплавов и получение КГПС в производственных условиях

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 термофор-

мованных распределителей металла Combo-bag. Модифицирование расплавов осуществлялось прутковой лигатурой *Al-Ti-B* из расчета 1...3 кг/т расплава.

Производство КГПС организовано в литейных отделениях на литейных машинах действующего производства ОК РУСАЛ. Одновременно отливаются от двух до четырех слитков размерами общей массой 60 т. Подготовка расплава и разливка сплава проводится в соответствии с требованиями технологических инструкций, а химический состав сплавов должен соответствовать требованиям ГОСТ 4784 - 2019 [92].

В процессе приготовления расплава производится отбор проб для анализа химического состава, содержание водорода, макро- и микроструктуры, содержание неметаллических включений (оценивается методом PoDFa, а оперативный контроль осуществляется системой Limca) с последующей маркировкой образцов.

Представленная выше разработанная методика определения параметров пористости для КГПС металлографическим методом [10] была подтверждена более развернутыми исследованиями, представленными в работе [5], где из каждого 1-го («горячий») и из каждого 4-го («холодный») слитка вырезается по три темплета. Далее из каждого темплета вырезается по три заготовки для определения механических свойств, технологичности при прокатке, а также оценки макро- и микроструктуры по сечению слитка, степени ликвации легирующих элементов [5]. Схема резки заготовок показана на рисунках 2.11–2.14.

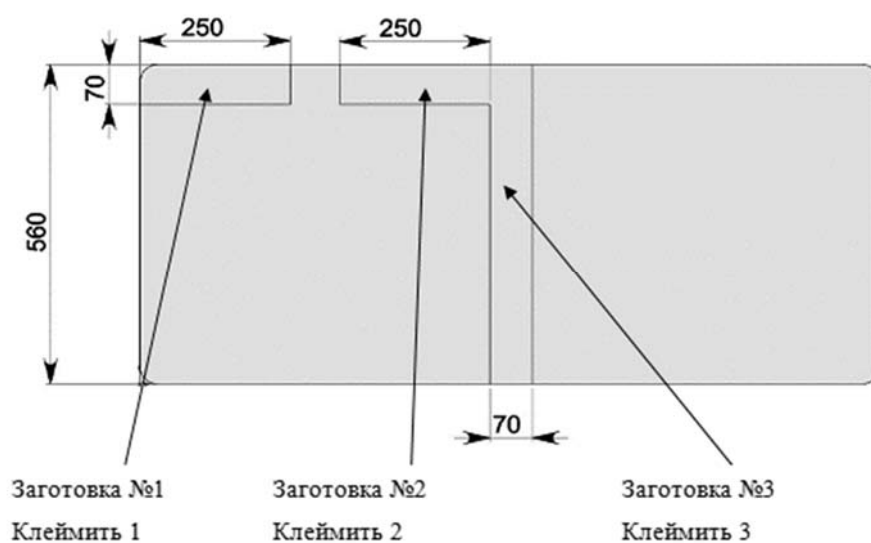


Рисунок 2.11 – Схема раскроя темплетов и маркировки заготовок

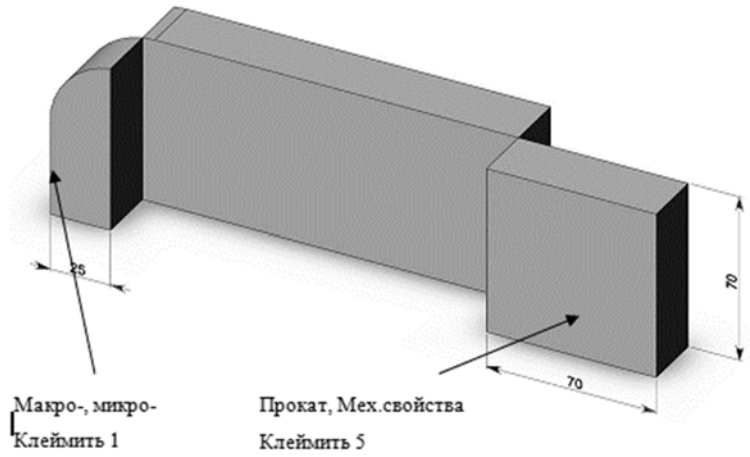


Рисунок 2.12 – Схема раскроя на образцы заготовки №1

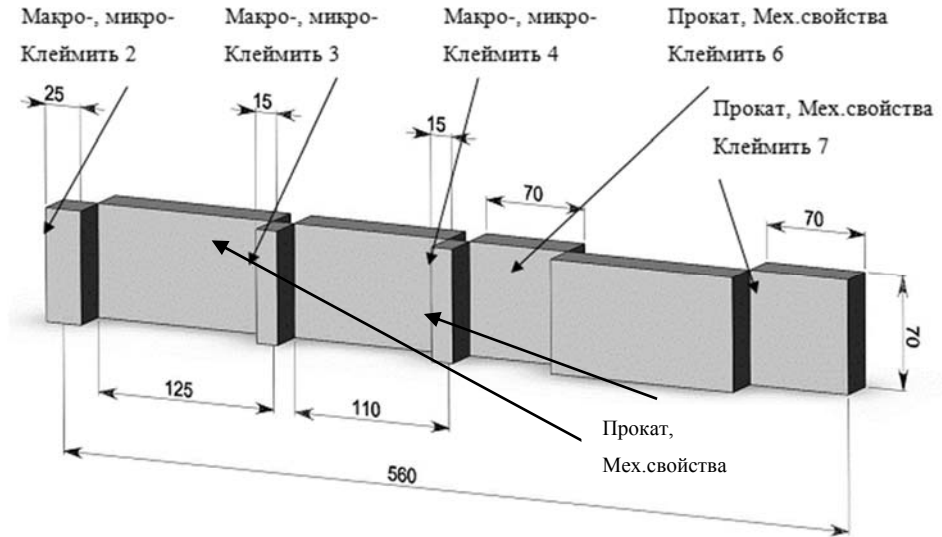


Рисунок 2.13 – Схема раскроя на образцы заготовки №2

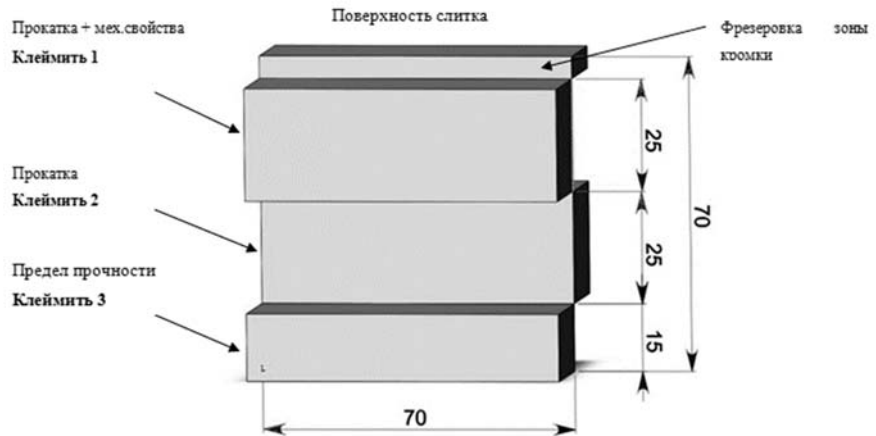


Рисунок 2.14 – Схема раскроя образцов №3



### 2.3 Методика анализа на содержание водорода в расплаве алюминия

Контроль содержания водорода в расплаве и в объеме КГПС осуществляли на газоанализаторах «G8 Galileo» [93] (рисунок 2.15) и анализаторе водорода RH 402 фирмы (Leco Corporation, США) [94] (рисунок 2.16), руководствуясь ГОСТ 21132.1-98 «Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы определения водорода в твердом металле вакуум-нагревом» [95]; ГОСТ 21132.0-75 «Алюминий и сплавы алюминиевые. Метод определения содержания водорода в жидком металле» [96]; ГОСТ Р 50965-96 «Алюминий и сплавы алюминиевые. Метод определения водорода в твердом металле» [97].



Рисунок 2.15 – Газоанализатор G8 Galileo [93]

Анализатор RH-402, объединенный с индукционной печью HF-400, является универсальным прибором для анализа водорода. Рабочие параметры печи настраиваются в соответствии с весом пробы, точностью анализа и подходят для анализа широкого спектра неорганических материалов, особенно веществ, имеющих низкое содержание водорода ( $< 2$  ppm).



Рисунок 2.16 – Анализатор водорода RH 402 фирмы LEKO [94]

В этом приборе используется метод плавления или горячей экстракции с помощью мощной индукционной печи. Взвешенная проба помещается в предварительно отожженный графитовый или кварцевый тигель, расплавляется или нагревается до температуры ниже температуры плавления (горячая экстракция) в потоке азота. Этим температур достаточно для выделения молекулярного водорода. Детектор – ячейка теплопроводности.

Следует отметить, что согласно проведенным исследованиям [98–100] концентрации водорода в расплаве на основных этапах литейного передела изготовления КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии от электролизера и до литейной машины обычно изменяется от 0,20 до 0,10 см<sup>3</sup>/100 г Al.

Для повышения точности пробоотбора на газосодержание было разработано специальное переносное устройство для отбора пробы из алюминиевого расплава сразу во время движения его по металлотрактору к литейной машине [101] (патент РФ на полезную модель № 183559 «Переносное устройство для отбора пробы жидкого металла»). На рисунке 2.17 показана схема переносного устройства. Переносное устройство для отбора пробы жидкого металла снабжено опорной плитой 1 для удержания корпуса 2 на определенной высоте относительно дна металлотракта 3 помощью фланца 4 и болтов 20, закрепленного на поверхности разборного корпуса 2 с соосно размещенной внутри него пробозаборной камерой 5, расположенной внутри разъемной трубы 6, соединенной снизу каналом 7, с защитным колпачком 8 для прохождения расплава 9, а сверху герметичной крыш-

кой 10 с отверстием 11 соосно соединенной с полой штангой 12 с вентилем 13, для отвода воздуха. Пробозаборная камера 5 выполнена в виде разъемной трубы 6 с неравномерной по высоте толщиной стенки, у которой снизу соосно установлена опорная втулка 14, соединенная с каналом 7 для расплава 9, а сверху - защитная крышка 15 с каналами для отвода воздуха 16, при этом на дне корпуса 2 выполнено отверстие 17, не больше, чем наружный диаметр опорной втулки 14 и не меньше, чем диаметр канала 7 для прохождения расплава 9 к пробозаборной камере 5; а внутри корпуса 2 между герметичной крышкой 10 и защитной крышкой 15 расположена втулка 18 для прижима пробозаборной камеры 5 ко дну разборного корпуса 2. Для соединения и фиксации половинок разъемной трубы 6 предусмотрен хомут 19.

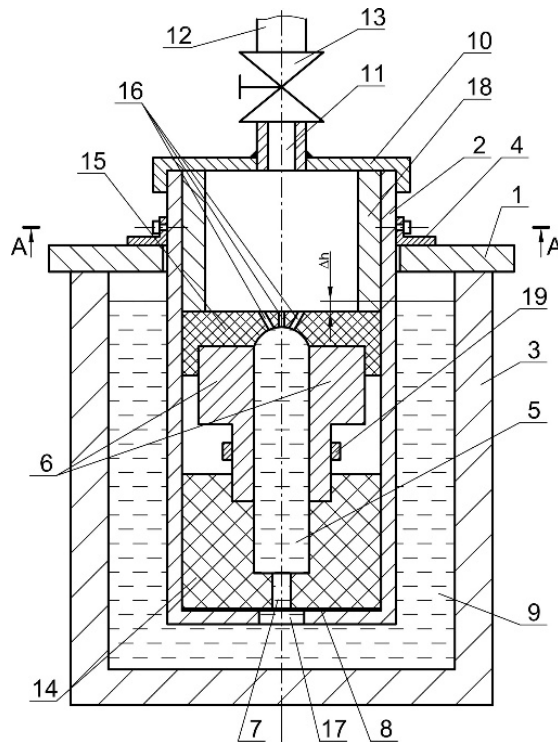


Рисунок 2.17 – Схема переносного устройства для отбора пробы жидкого металла

Предлагаемое переносное устройство для отбора пробы жидкого металла 9 работает следующим образом. Перед началом работы собирают пробозаборник. Для этого соединяют половинки разъемной трубы 6 с помощью хомута 19, а затем разъемную трубу 6 вставляют в опорную муфту 14, а сверху накладывают защитную крышку 15 с каналами для отвода воздуха 16. Далее на дно разборного корпуса 2 помещают защитный колпачок 8, на который устанавливают собранную

конструкцию пробозаборной камеры 5. Затем на защитную крышку 15 помещают прижимную втулку 18, а разборный корпус 2 закрывают герметичной крышкой 10 с отверстием 11 соосно соединенной с полую штангой 12 для отвода газов с вентилем 13, который находится в положение «закрыто».

Соединение герметичной крышки 10 с разборным корпусом 2 может быть выполнено в виде соединения-защелки или в виде байонетной муфты или в виде резьбового соединения, чтобы обеспечить простое и герметичное присоединение.

Затем на поверхности разборного корпуса 2 на нужной высоте закрепляют фланец 4 и болты 20. Далее собранное переносное устройство перед забором проб необходимо прогреть до температуры не менее  $100^{\circ}\text{C}$ , чтобы удалить всю влагу, которая может существенно повлиять на точность результатов исследования. После нагрева предлагаемое устройство готово к работе.

Перед непосредственным отбором проб на металлотракт 3 с расплавом 9 устанавливают собранное переносное устройство опорную плиту 1 (обычно рядом с входом в кристаллизатор).

Глубина погружения разборного корпуса 2 в металлотракт 3 должна быть такой, чтобы уровень расплава 9 в металлотракте 3 был больше высоты положения поверхности защитной крышки 15 на  $\Delta h \geq 50$  мм для создания необходимого металлостатического давления расплава для полного заполнения пробозаборной камеры 5.

После погружения предлагаемого устройства на требуемую глубину в расплав 9 открывают вентиль 13 на  $8 \div 10$  секунд. За это время расплав 9 расплавляет защитный колпачок 8 и происходит заполнение полости пробозаборной камеры 5, вытесняя воздух через каналы для отвода воздуха 16 в защитной крышке 15 и далее через полую штангу 12 для отвода воздуха с открытым вентилем 13. Затем вентиль перекрывают, и предлагаемое устройство извлекают из опорной плиты 1 и помещают в холодильник (на чертеже не показан) для охлаждения до комнатной температуры. Далее предлагаемое устройство разбирают в обратном порядке, и достают пробоотборник, который отдают сразу для проведения исследований.

Для повышения оперативности и точности контроля содержания водорода в расплаве разработан новый способ (патент РФ № 2665585 «Способ определения содержания водорода в алюминиевых сплавах») [102], 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.

## **2.4 Выводы по главе 2**

1. Разработаны новые технические решения, направленные на совершенствование методики и оборудования для анализа содержания водорода в расплаве алюминия и обеспечивающие необходимую точность и оперативность для контроля содержания водорода в расплаве непосредственно в производственных условиях, в том числе:

- патент на полезную модель РФ № 183559 «Переносное устройство для отбора пробы жидкого металла»;

- патент РФ № 2665585 «Способ отбора пробы жидкого металла».

2. Усовершенствована методика определения пористости в объеме КГПС, соответствующая современным требованиям мировых потребителей продукции.

### **ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОРИСТОСТИ ПРИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ КГПС ИЗ СПЛАВОВ 5XXX СЕРИИ**

В главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований морфологии пористости, совокупной характеристики пор, включающей в себя их размер, форму и пространственную ориентацию, в зависимости от конструктивных и технологических параметров полунепрерывного литья КГПС с помощью компьютерного моделирования и во время проведения опытно-промышленных плавок. Основное содержание главы опубликовано в работах [10, 89, 90].

#### **3.1 Компьютерное моделирование морфологии пористости при полунепрерывном литье КГПС**

Целью моделирования было разработать компьютерную модель процесса затвердевания и кристаллизации КГПС размерами 600x1630 мм и 600x1750 мм, изготавливаемого полунепрерывным методом литья в кристаллизатор скольжения системы Wagstaff [3] для исследования структуры по всему объему слитка при известном химическом составе и параметрах литья в диапазоне их изменения по действующей технологии производства КГПС сплава 5083 на литейном агрегате металлургического завода ОК «РУСАЛ».

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 [5].

Для проведения компьютерного моделирования применялся программный комплекс ProCAST и использовался полный объем слитка сечением разбитый на характерные зоны по охлаждению. Для имитации 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.

Исходные данные и варианты компьютерного моделирования представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные и варианты компьютерного моделирования

№	Сечение кристаллизатора, мм	Скорость литья, мм /мин	Уровень металла в кристаллизаторе, мм (высота кристаллизатора 110 мм)	Марка сплава	Расход воды на кристаллизатор, м <sup>3</sup>	Температура охлаждающей воды, °С	Температура металла в кристаллизаторе, °С	Тип Combo-bag
1	600x1630 Epsilon	40	45	5083	32,50	17÷22	690÷700	13 дюймов с донными отверстиями
2			51					
3			57					
4		50	45					
5			51					
6			57					
7		60	45					
8			51					
9			57					
10	600x1750 Epsilon	40	45					
11			51					
12			57					
13		50	45					
14			51					
15			57					
16		60	45					
17			51					
18			57					

Химический состав сплава 5083 по EN 485-2 2007 (зарубежный аналог сплава АМг 4.5 по ГОСТ 4784-2019 [92]) представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Химический состав исследуемого сплава 5083

Компоненты	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Содержание, %	0,14	0,16	0,50	4,8	0,16	0,10	0,02

При решении задачи по распределению микропористости в слитке 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 3.1 представлено температурное поле КГПС в разрезе. На рисунках 3.2 – 3.7 представлены распределения пористости по сечению слитка для всех вариантов моделирования.

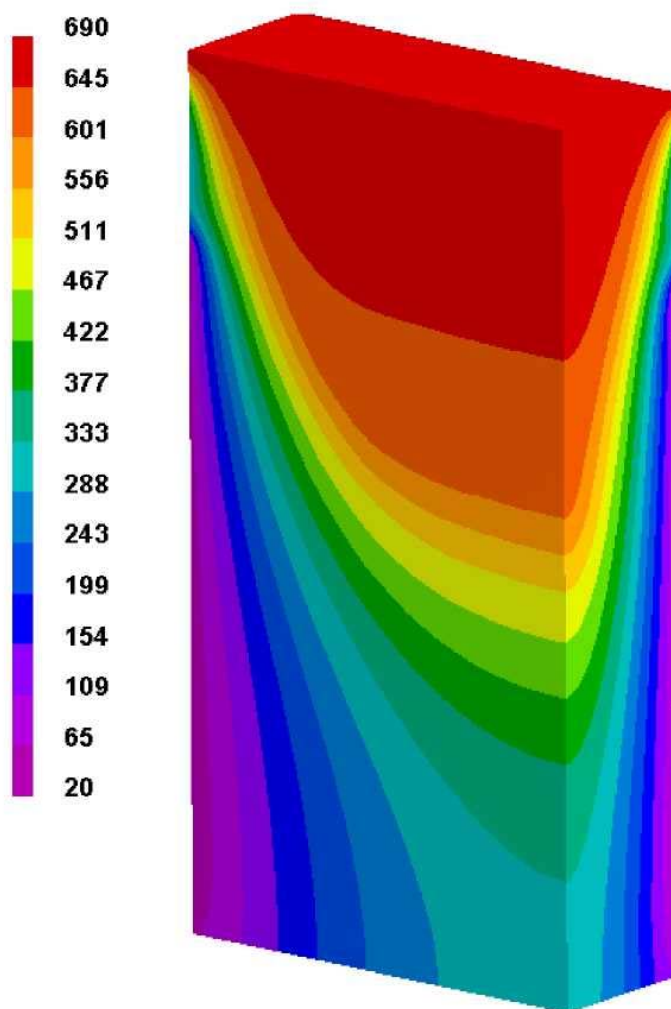


Рисунок 3.1 – Температурное поле КГПС в разрезе, °С.



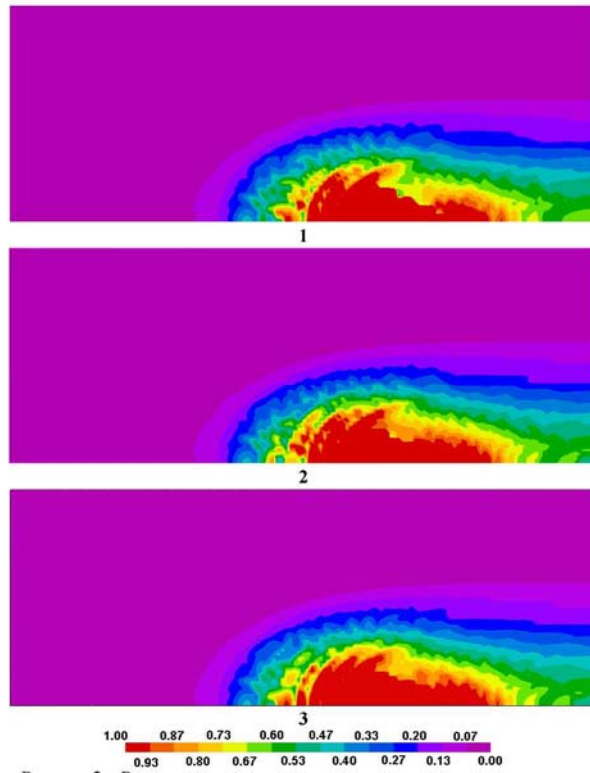


Рисунок 3.2 – Распределение пористости в объеме слитка размером 600x1630 мм, скорость литья 40 мм/мин. (уровень металла: 1 – 45 мм, 2 – 51 мм, 3 – 57 мм)

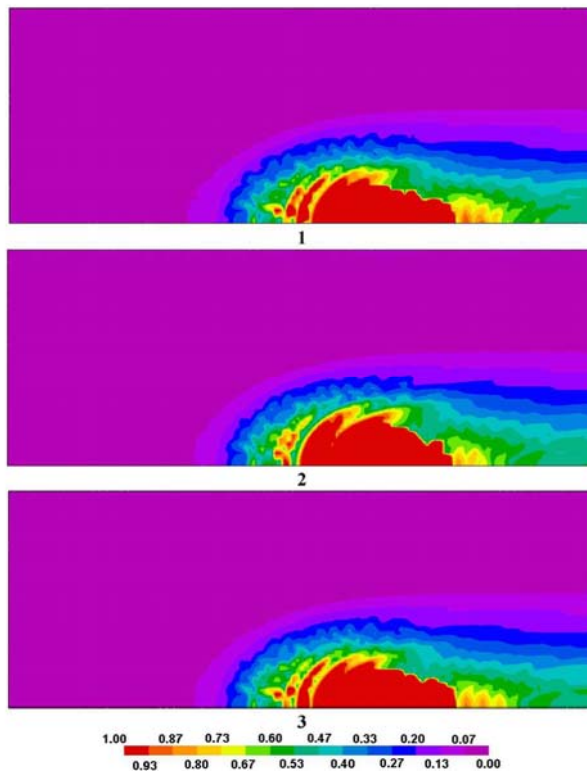


Рисунок 3.3 – Распределение пористости в объеме слитка размером 600x1630 мм, скорость литья 50 мм/мин (уровень металла: 1 – 45 мм, 2 – 51 мм, 3 – 57 мм)

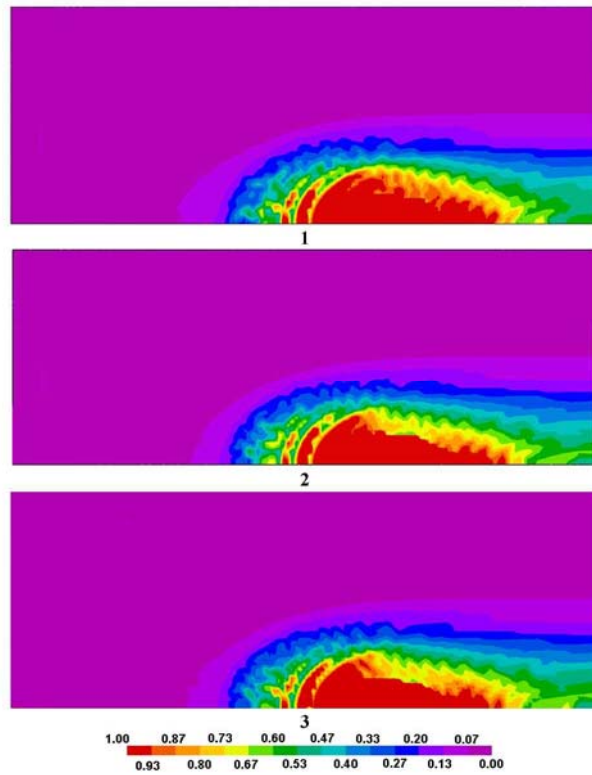


Рисунок 3.4 – Распределение пористости в объеме слитка размером 600x1630 мм, скорость литья 60 мм/мин. (уровень металла: 1 – 45 мм, 2 – 51 мм, 3 – 57 мм)

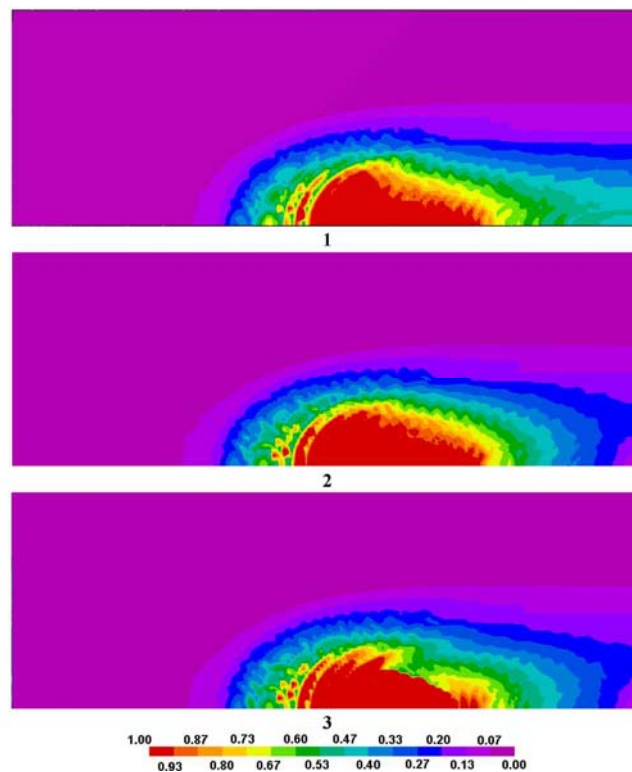


Рисунок 3.5 – Распределение пористости в объеме слитка размером 600x1750 мм, скорость литья 40 мм/мин. (уровень металла: 1 – 45 мм, 2 – 51 мм, 3 – 57 мм)

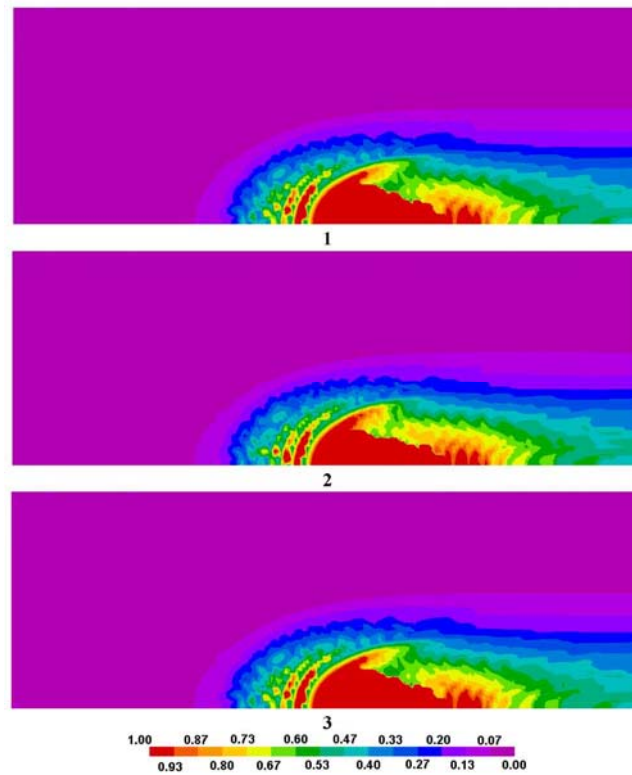


Рисунок 3.6 – Распределение пористости в объеме слитка размером 600x1750 мм, скорость литья 50 мм/мин. (уровень металла: 1 – 45 мм, 2 – 51 мм, 3 – 57 мм)

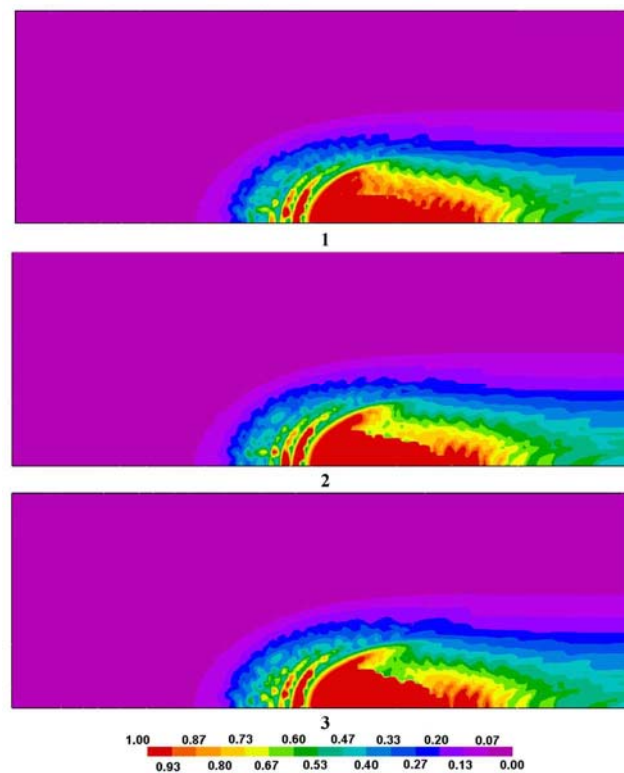


Рисунок 3.7 – Распределение пористости в объеме слитка размером 600x1750 мм, скорость литья 60 мм/мин. (уровень металла: 1 – 45 мм, 2 – 51 мм, 3 – 57 мм)

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 перерасчет процента пористости на плоскости равной 25 мм<sup>2</sup> и вычислялась площадь, занимаемая порой. Далее принималась толщина поры равная 1,0 мкм и вычислялась ее возможная длина на плоскости соответствующая занимаемой площади в модели. В таблице 3.3 представлены результаты моделирования.

Таблица 3.3 – Результаты моделирования пористости

№ Варианта	Сечение слитка, мм	Скорость литья, мм/мин	Уровень металла, мм	Средняя величина пористости по сечению, %	Максимальная величина пористости по сечению, %	Минимальная величина пористости по сечению, %	Величина пористости в точке 1, %	Размер поры точка 1, мкм	Величина пористости в точке 2, %	Размер поры точка 2, мкм
1	600x1630	40	45	0,169	0,588	0,001	0,391	98	0,145	36
2			51	0,233	0,608	0,001	0,437	109	0,154	38
3			57	0,259	0,697	0,001	0,482	121	0,164	41
4		50	45	0,208	0,525	0,001	0,783	196	0,133	33
5			51	0,218	0,544	0,001	0,792	198	0,145	36
6			57	0,225	0,571	0,001	0,805	201	0,155	38
7		60	45	0,201	0,759	0,001	0,553	138	0,113	28
8			51	0,208	0,788	0,001	0,564	141	0,120	30
9			57	0,212	0,792	0,001	0,607	152	0,122	31
10	600x1750	40	45	0,174	0,622	0,001	0,353	88	0,139	35
11			51	0,219	0,684	0,001	0,425	106	0,151	37
12			57	0,227	0,709	0,001	0,474	119	0,167	41
13		50	45	0,224	0,685	0,001	0,481	120	0,144	36
14			51	0,266	0,703	0,001	0,499	125	0,175	44
15			57	0,289	0,745	0,001	0,512	128	0,208	52
16		60	45	0,237	0,701	0,001	0,492	123	0,177	44
17			51	0,256	0,735	0,001	0,513	128	0,188	47
18			57	0,274	0,754	0,001	0,522	131	0,193	48

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 600x1630 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 600x1750 при уровне металла 57 мм и скорости литья 50 мм/мин.

### **3.2 Исследование пористости в КГПС в условиях промышленного производства**

На основе анализа научно-технической литературы и результатов компьютерного моделирования морфологии пористости в объеме КГПС были установлены основные закономерности образования на пористости в объеме слитков.

На первом этапе проанализировали размер пористости в объеме КГПС из следующих сплавов 5XXX серии: 5083, 5182, 5052, изготовленных по «штатной» заводской технологии в литейном отделении алюминиевого завода ОК РУСАЛ с использованием следующего основного оборудования:

- поворотный раздаточный миксер емкостью 70 т расплава;
- установка рафинирования HD-2000;
- установка рафинирования «SNIF SHEER P-180UHB»;
- фильтр тонкой очистки «Mitsui» с картриджами Rb;
- камера фильтрации под два пенокерамических фильтра 50 ppi (23 дюйма) с крышкой нагрева;

- гидравлическая литейная машина «Wagstaff Shurcast» грузоподъемностью 80 т.

КГПС из сплавов 5083 и 5052 имели размеры 600x1630 мм, а из сплава 5182 - 600x2000 мм.

Подготовка оборудования и приготовление расплавов проводилось в соответствии со стандартной практикой ОК РУСАЛ.

Требуемый и фактический химический состав сплавов представлен в таблице 3.4.

Литье КГПС из сплава 5083, сечением 600x1630 мм, проводилось в соответствии с заводскими технологическими инструкциями:

- количество одновременно отливаемых слитков - 4 шт.;
- фактическая длина слитков - 4830 мм;
- дегазация установкой рафинирования «SNIF SHEER P-180UHB» 3 ротора;
- расход аргона - 4,0 нм<sup>3</sup>/ч в начале литья и 4,5 нм<sup>3</sup>/ч в конце литья на первый и второй ротор;
- расход хлора 0,05 н м<sup>3</sup>/ч на первый ротор;
- скорость вращения роторов SNIF - 450 об/мин;
- фильтрация ПКФ 50 ppi;
- фильтры ПКФ Pyrotek №470, №431;
- фильтрация PTF Mitsui с картриджами Rb;
- лигатура для модифицирования зерна Aleastur AlTi5B1 с расходом 1,0 кг/т;
- место подачи модифицирующей лигатуры 50% до PTF и 50% после PTF;
- распределители металла Combo-bag TF 13 дюймов с донными отверстиями;
- HD-2000 не использовался;
- цикл перемешивания МГД - 3 цикла по 20 минут;
- уровень расплава в лотке перед ПКФ - 199 мм, а после ПКФ 232 мм.

Тепловые условия литья представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.4 – Фактический химический состав исследуемых сплавов 5XXX серии

Сплав	H	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие элементы	Прочие		Al
											каждый	всего	
Сплав 5083													
min	-	-	-	-	0,4	4,0	0,05	-	-	Na<0.0005	0,05	0,15	Остальное
max	0,15	0,40	0,40	0,10	1,0	4,9	0,25	0,25	0,15	Li<0.0001			
факт	0,10	0,083	0,16	0,01	0,56	4,66	0,08	0,01	0,04	Fe/Si =1,9			
Сплав 5182													
min	-	-	-	-	0,20	4,0	-	-	-	B<0.0050	0,05	0,15	Остальное
max	0,15	0,20	0,35	0,15	0,50	5,0	0,10	0,25	0,10	Na<0.0001			
факт	0,10	0,08	0,28	0,004	0,33	4,30	0,001	0,007	0,02	Ca<0.0003 Li<0.0004 Pb<0.0090			
Сплав 5052													
min	-	-	-	-	-	2,20	0,15	-	-	B<0.0050	0,05	0,15	Остальное
max	0,15	0,25	0,40	0,10	0,10	2,80	0,35	0,10	0,03	Na<0.0001			
факт	0,11	0,08	0,28	0,004	0,08	2,64	0,198	0,009	0,01	Ca<0.0003 Li<0.0004 Pb<0.0090			

Таблица 3.5 – Показатели термометров на оборудовании

	Температура в оборудовании, °С				
	SNIF	Mitsui	расплава в миксере	расплава в лотке	воды в кристаллизаторе
Требование	720÷740	720÷730	700÷750	-	<26
Фактическое значение	727	730	715	683	16

Литье КГПС из сплава 5052, сечением 600x1630 мм, проводилось в соответствии с заводскими технологическими инструкциями:

- количество слитков - 2 шт.;
- фактическая длина слитков - 8600 мм;
- дегазация установкой рафинирования «SNIF SHEER P-180УНВ» 3 ротора;

- расход аргона - 4,0 нм<sup>3</sup>/ч в начале литья, 4,0 нм<sup>3</sup>/ч в конце литья на первый и второй ротор;
  - расход хлора 0,05 нм<sup>3</sup>/ч
  - скорость вращения роторов SNIF - 450 об/мин;
  - фильтрация ПКФ 50 ррi;
  - фильтры ПКФ Pyrotek № 184, № 183;
  - фильтрация PTF Mitsui с картриджами Rb
  - лигатура для модифицирования Aleastur AlTi5B1 с расходом 1,0 кг/т;
  - место подачи модифицирующей лигатуры 50% до PTF и 50% после PTF;
  - распределители металла Combo-bag TF 13 дюймов с донными отверстиями;
  - HD-2000 не использовался;
  - цикл перемешивания МГД - 3 цикла по 20 минут;
  - уровень металла в лотке перед ПКФ - 200 мм, после ПКФ 254 мм.
- Тепловые условия литья представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Показатели термометров на оборудовании

	Температура в оборудовании, °С				
	SNIF	Mitsui	расплава в миксере	расплава в лотке	воды в кристаллизаторе
Требование	720÷740	720÷730	700÷750	-	<26
Фактическое значение	728	730	725	696	20

Литье КГПС из сплава 5182, сечением 600x2000 мм, проводилось в соответствии с заводскими технологическими инструкциями:

- количество слитков - 3 шт.;
- фактическая длина слитков - 5000 мм;
- дегазация установкой рафинирования «SNIF SHEER P-180UHB» 3 ротора;
- расход аргона - 5,0 нм<sup>3</sup>/ч в начале литья, 5,0 нм<sup>3</sup>/ч в конце литья на первый и второй ротор;



- скорость вращения роторов SNIF - 450 об/мин;
- расход хлора 0,05 нм<sup>3</sup>/ч на первый ротор;
- фильтрация ПКФ 50 ppi;
- фильтры ПКФ Pyrotek №264, №245;
- фильтрация PTF Mitsui с картриджами Rb;
- лигатура для измельчения зерна Aleastur AlTi5B1 с расходом 1,0 кг/т;
- место подачи модифицирующей лигатуры 50 % до PTF и 50% после PTF;
- распределители металла Combo-bag TF 13 дюймов с донными отверстиями;
- HD-2000 не использовался;
- цикл перемешивания МГД - 3 цикла по 20 минут;
- уровень металла в лотке перед ПКФ - 200 мм, после ПКФ 239 мм;
- ручное рафинирование. Масса использованного флюса Экораф Ф-1 - 20 кг, ручное перемешивание. Подача трубой.

Тепловые условия литья представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Показатели термометров на оборудовании

	Температура в оборудовании, °С				
	SNIF	Mitsui	расплава в миксере	расплава в лотке	воды в кристал- лизаторе
Требование	720÷740	720÷730	700÷750	-	<26
Фактическое значение	732	728	721	694	19

Количественной оценку пористости проводили металлографическим методом [10]. Отбор темплетов от КГПС и образцов от темплетов проводился по схемам, представленных на рисунке 2.3 и 2.4.

Результаты количественного анализа исследований текущей пористости в объеме КГПС из сплавов 5XXX серии: 5083, 5182, 5052, изготовленных по «штатной» заводской технологии, представлены в таблицах 3.8 и 3.9, а также в виде графиков на рисунке 3.8.

Таблица 3.8 – Параметры пористости, размер дендритной ячейки и размер зерна по сечению темплетов

Зона отбора образцов	Расстояние от прокатной поверхности, мм	№ п/п	Единичная пора				Очаг пористости			Объемная доля пор, %	Размер дендритной ячейки, мкм	Размер зерна, мкм		
			длина, мкм	ширина, мкм	среднее значение, мкм	площадь, мкм <sup>2</sup>	длина, мкм	ширина, мкм	среднее значение, мкм					
горячий	донник	край	30	1	39,0	12,0	25,5	179	87,4	54,6	71	0,11	50	75
			170	2	119,0	83,0	101,0	1836	278,9	188,4	234	0,34	90	125
			280	3	428,0	130,0	279,0	16145	314,3	171,3	243	0,34	80	100
		центр	30	4	32,0	23,0	27,5	215	112,6	35,0	73,8	0,09	60	90
			170	5	171,0	84,0	127,5	3465	205,7	144,6	175	0,42	90	120
			280	6	159,0	67,0	113,0	1598	352,1	211,3	282	0,27	85	105
	литник	край	30	7	26,0	11,0	18,5	91	118,5	75,3	96,9	0,12	60	85
			170	8	128,0	26,0	77,0	1003	385,2	72,4	229	0,34	85	125
			280	9	155,0	65,0	110,0	3073	338,6	173,8	256	0,27	95	105
		центр	30	10	55,0	33,0	44,0	369	94,9	52,8	73,8	0,12	60	90
			170	11	109,0	41,0	75,0	1136	262,4	85,6	174	0,32	95	105
			280	12	234,7	92,0	163,4	2800	166,3	328,6	247	0,29	90	100
холодный	донник	край	30	13	41,0	16,0	28,5	257	115,8	96,1	114	0,17	50	90
			170	14	112,0	44,0	78,0	1472	227,7	68,7	148	0,38	90	110
			280	15	118,0	72,0	95,0	1376	371,0	217,9	294	0,32	85	100
		центр	30	16	42,0	23,0	32,5	305	113,8	27,0	70,4	0,09	60	90
			170	17	201,0	93,0	147,0	3186	256,8	148,4	203	0,51	95	110
			280	18	180,0	99,0	139,5	3385	342,8	252,3	298	0,26	85	100
	литник	край	30	19	54,0	40,0	47,0	438	104,7	26,3	65,5	0,11	55	80
			170	20	133,0	92,0	112,5	2442	229,8	34,7	132	0,41	85	100
			280	21	106,0	33,0	69,5	914	265,4	118,9	192	0,29	85	100
		центр	30	22	57,0	27,0	42,0	614	155,8	97,8	127	0,096	50	90
			170	23	178,0	47,0	112,5	1958	194,9	115,6	155	0,36	85	100
			280	24	254,0	89,0	171,5	2919	351,2	215,5	283	0,21	85	105

В образцах, отобранных на расстоянии 30 мм от прокатной поверхности, средний размер единичных пор менее 60 мкм. Линейные размеры очагов пор находятся в диапазоне 66...127 мкм. В доннике горячего и холодного слитка размер очагов пор меньше, чем в литнике [10]. По всем зонам в холодном слитке линейный размер единичных пор больше по сравнению с горячим слитком. Объемная доля пористости в рассматриваемых зонах горячего и холодного слитков практически одинакова, в среднем составляет 0,11 %.

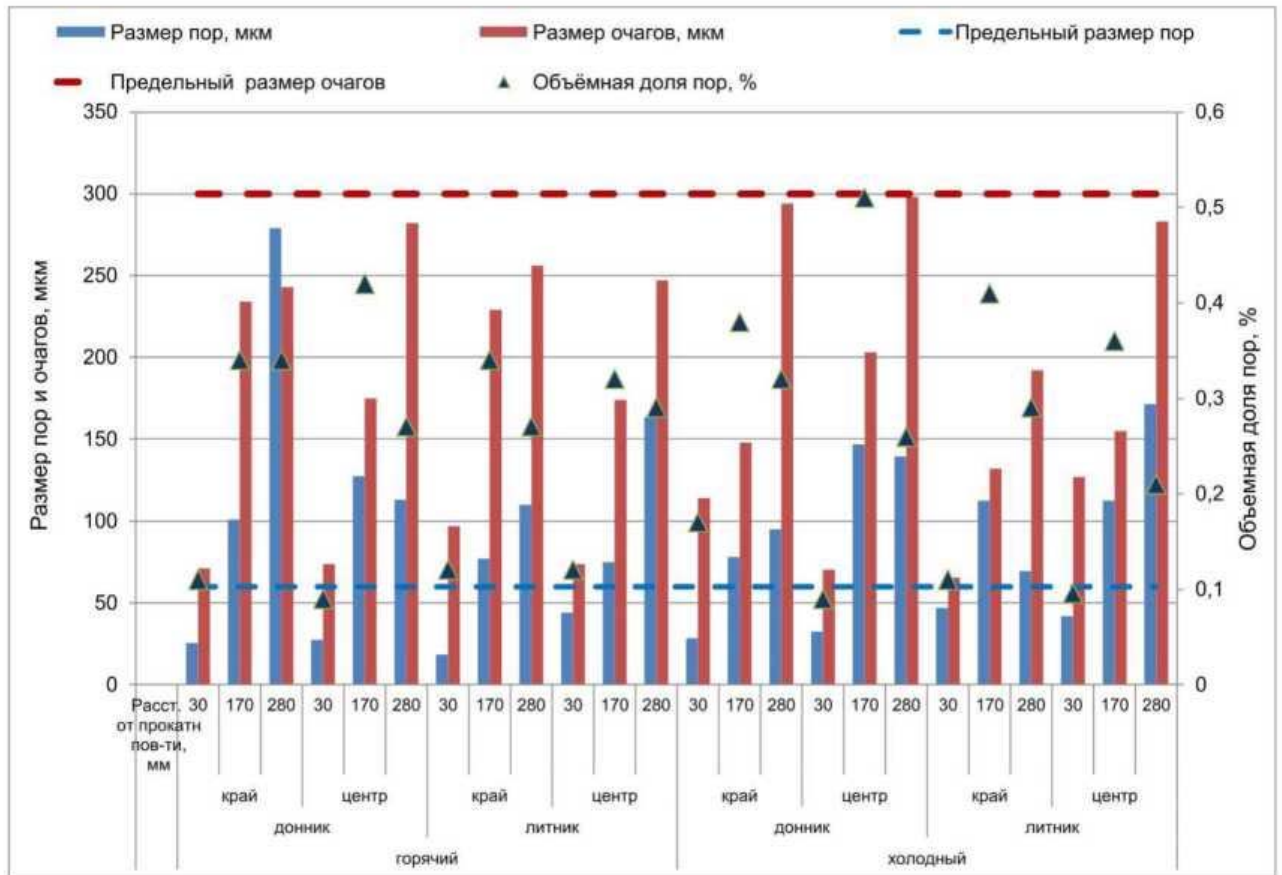


Рисунок 3.8 – Распределение единичных пор, очагов пор и объемной доли пористости по сечению КГПС

В образцах, отобранных на расстоянии 170 мм от прокатной поверхности, средний размер единичных пор превышает 60 мкм, и находится в диапазоне 75÷147 мкм. Во всех зонах холодного слитка средний размер пор больше, чем горячем [10]. Наиболее крупный средний размер единичных пор в горячем и холодном слитках наблюдается в центральной части донника. Наибольший размер очагов пор в горячем слитке находится в крайней части литника и донника, а в холодном слитке в центральной части литника и донника.

В образцах, отобранных на расстоянии 280 мм от прокатной поверхности, средний размер единичных пор более 60 мкм. В горячем слитке средний размер единичных пор несколько больше, чем в холодном и находится в диапазоне 110...280 мкм, в холодном слитке средний размер единичных пор – 70...170 мкм [10]. Размер очагов пор по сечению горячего и холодного слитка практически одинаковый.

Максимальная объемная доля пор (0,39 %) наблюдается на расстоянии 170 мм от прокатной поверхности слитка, что более чем в 3 раза превышает объемную долю пор (0,11%) на расстоянии 30 мм от прокатной поверхности, и в 1,5 раза превышает объемную долю пор (0,28%) в образцах, отобранных на расстоянии 280 мм от прокатной поверхности [10]. Размер зерна слитков мелкий - 50÷60 мкм (на расст. 30 мм), 100...125 мкм (на расст. 170 мм) и 100÷105 мкм (на расст. 280 мм). В холодном слитке размер зерна и дендритной ячейки более равномерный по сечению темплетов.

Таблица 3.9 – Параметры пористости в объеме КГПС из сплавов 5XXX серии

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

Таким образом, проведенные исследования пористости в объеме КГПС из сплавов 5XXX серии: 5083, 5182, 5052, изготовленных по «штатной» заводской технологии в литейном отделении алюминиевого завода ОК РУСАЛ, показали, что на расстоянии 30 мм от прокатной поверхности наблюдаются минимальные значения по всем параметрам пористости [10]. 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÷280 мкм) и не соответствует требованиям таких зарубежных потребителей, как (для компаний Altek (Турция), PM (Италия), Gleich (Германия) и др.): по размеру единичных микропор – не более 60 мкм и очагов пор – не более 300 мкм.

На втором этапе были проведены сравнительные исследования пористости в объеме КГПС из следующих сплавов 5XXX серии: 5052 и АМг2 изготовленных по опытной технологии, которая отличалась от штатной повышенным расходом хлора и аргона и увеличенной скоростью вращения ротора SNIF, увеличенным расходом модифицирующей лигатуры, сниженной скоростью литья на 10 мм (с 60

до 50 мм/мин.); и поднятым уровнем расплава в кристаллизаторе на 6,0 мм с 49 до 55 мм.

В таблице 3.10 показан требуемый и фактический химический состав исследуемых сплавов. Температурные условия литья КГПС из сплавов 5052 и АМг2 приведены в таблицах 3.11 и 3.12 соответственно.

Таблица 3.10 – Требуемый и фактический химический состав исследуемых сплавов

	Массовая доля элемента, %													Содержание H <sub>2</sub> , см <sup>3</sup> /100г
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Na	Pb	Cd	As	Hg	
5052	0,11	0,32	0,002	0,08	2,64	0,198	0,009	0,01	0,00007	0,0007	0,0003	-	0,0005	0,11
ТС 44001-113 рев.2	0,09-0,13	0,27-0,35	<0,10	0,07-0,10	2,40-2,70	0,18-0,25	<0,10	<0,03	<0,0003	-	-	-	-	<0,15
АМг2	0,12	0,33	0,01	0,38	2,23	0,03	0,01	0,01	0,0004	0,001	0,0003	0,0004	0,0005	0,10
ТУ 150.02.01.04-2019	0,1-0,2	0,3-0,4	<0,15	0,35-0,45	2,1-2,3	<0,05	<0,15	<0,1	<0,0004	-	-	<0,015	-	<0,25

Таблица 3.11 – Температурные условия литья КГПС из сплава 5052

	Температура, °С				
	SNIF	Mitsui	Расплава в миксере	Расплава в лотке	воды
Требование	720-740	720-730	700-750	-	< 26
Фактическое значение	727	730	730	696	20

Таблица 3.12 – Температурные условия литья КГПС из сплава АМг2

	Температура, °С				
	SNIF	Mitsui	Расплава в миксере	Расплава в лотке	воды
Требование	720-740	720-730	700-750	-	< 26
Фактическое значение	725	730	717	692	19

Литье КГПС проводилось в литейном отделении алюминиевого завода с использованием следующего основного оборудования:

- поворотный раздаточный миксер емкостью 70 т расплава;
- установка рафинирования HD-2000;

- установка рафинирования «SNIF SHEER P-180UHB»;
- фильтр тонкой очистки «Mitsui» с картриджами Rb;
- камера фильтрации под два пенокерамических фильтра 50 ppi (23 дюйма) с крышкой нагрева;
- гидравлическая литейная машина «Wagstaff Shurcast» грузоподъемностью 80 т.

КГПС из сплава 5052 имел размеры 560x1310 мм, а из сплава АМг2 - 600x1630 мм.

Подготовка оборудования и приготовление расплавов проводилось в соответствии со стандартной практикой ОК РУСАЛ. В процессе приготовления расплава рафинирование расплава установкой HD-2000 не производилось.

Производство КГПС из сплава 5052, сечением 560x1310 мм, производилось в соответствии с требованиями ТС 440-01-0147 ред.1:

- количество слитков - 5 шт. с фактической длиной 5800 мм;
- дегазация установкой рафинирования «SNIF SHEER P-180UHB» 3 ротора с расходом аргона - 5,5 нм<sup>3</sup>/ч на все роторы и с расходом хлора 0,1 нм<sup>3</sup>/ч на первый ротор, 0,08 нм<sup>3</sup>/ч - на второй ротор;
- скорость вращения роторов SNIF - 450 об/мин;
- фильтрация ПКФ 50 ppi с использованием фильтров Drache №19018648, №19018649;
- фильтрация PTF Mitsui с картриджами Rb;
- лигатура для модифицирования марки Aleastur AlTi5B1 с расходом 1,0 кг/т и местом подачи: 50% - до PTF и 50% - после PTF;
- распределители металла Combo-bag TF 13 дюймов с донными отверстиями;
- HD-2000 не использовался;
- 1 цикл 20 минут перемешивания МГД;
- уровень металла в лотке перед ПКФ - 200 мм и после ПКФ 230 мм.

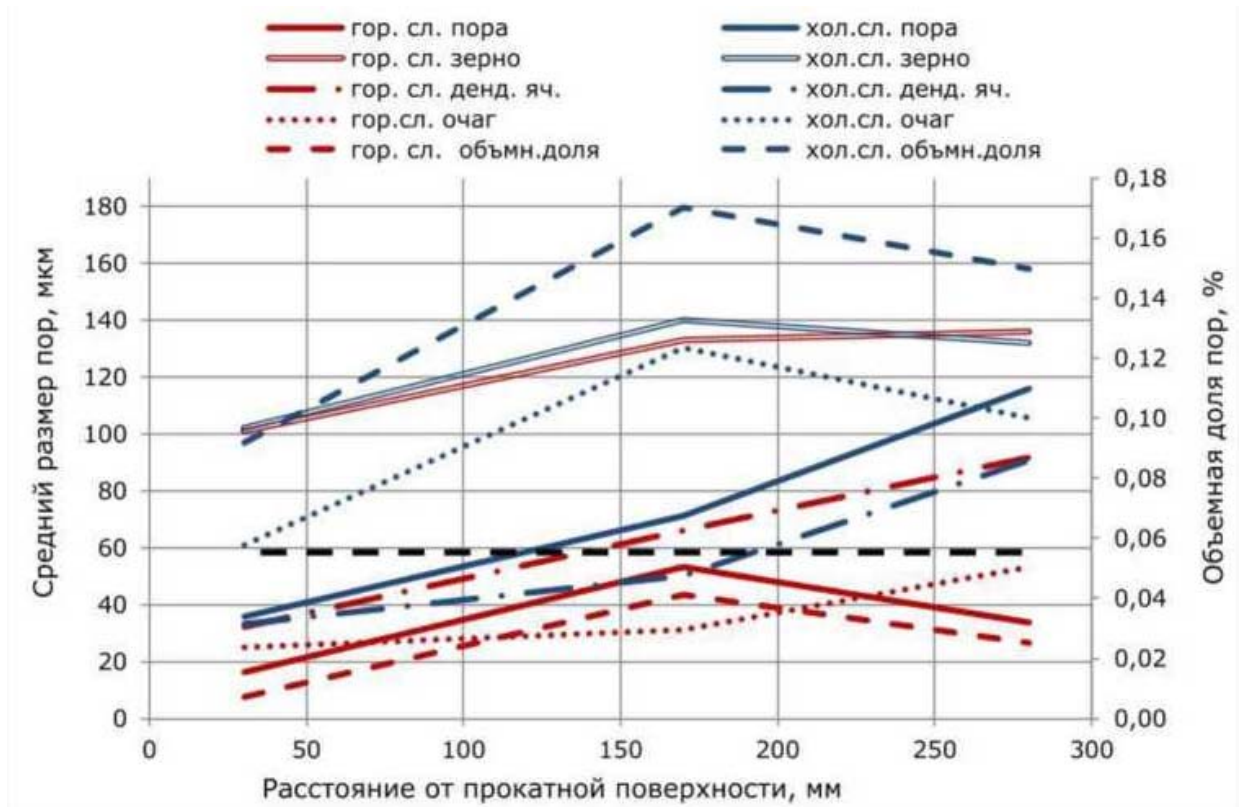
Производство КГПС из сплава АМг2, сечением 600x1630 мм, производилось в соответствии с требованиями ТУ 150.02.01.04-2019 ред.1:

- количество слитков - 4 шт. с фактической длиной 6000 мм;
- дегазация установкой рафинирования «SNIF SHEER P-180UHB» 3 ротора с расходом аргона - 4,0 нм<sup>3</sup>/ч на все роторы и с расходом хлора 0,07 нм<sup>3</sup>/ч на первый ротор, 0,03 нм<sup>3</sup>/ч - на второй ротор;
- скорость вращения роторов SNIF - 450 об/мин;
- фильтрация ПКФ 50 ррi с использованием фильтров Drache №19018678, №182549900;
- фильтрация PTF Mitsui с картриджами Rb;
- лигатура для модифицирования марки Aleastur AlTi5B1 с расходом 1,0 кг/т и местом подачи: 50% - до PTF и 50% - после PTF;
- распределители металла Combo-bag TF 13 дюймов с донными отверстиями;
- HD-2000 не использовался;
- 3 цикла по 20 минут перемешивания МГД;
- уровень металла в лотке перед ПКФ - 200 мм и после ПКФ 237 мм.

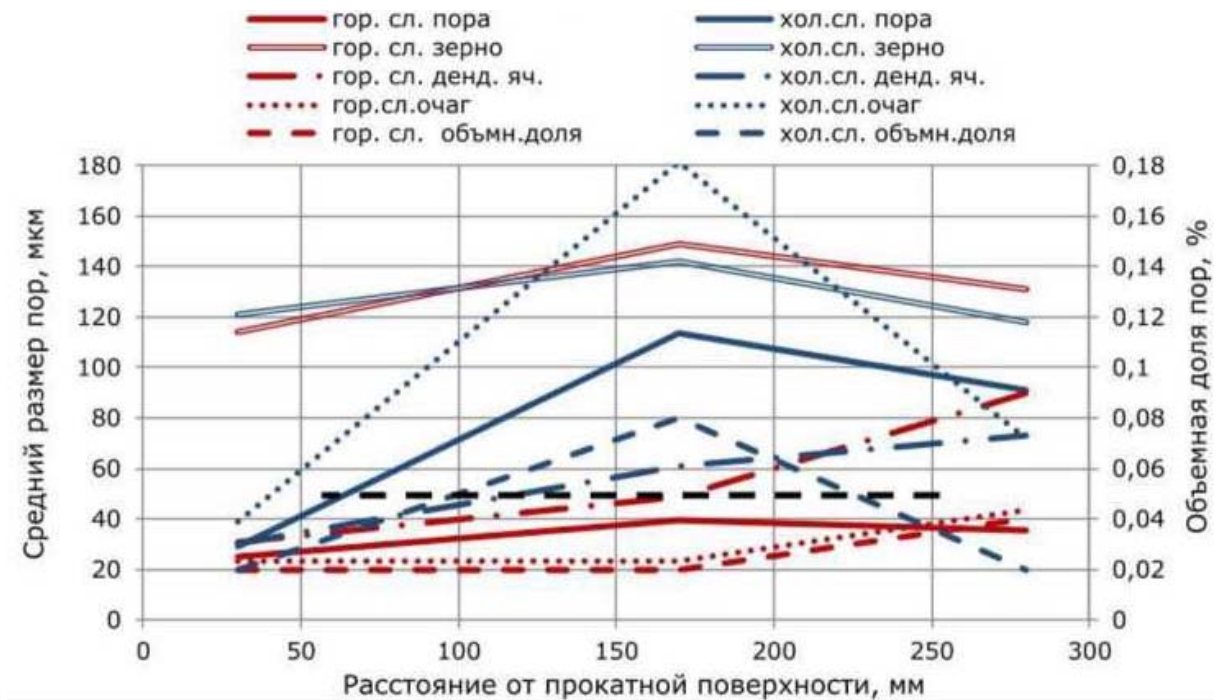
Количественный анализ пористости проводился в соответствии с разработанной методикой в настоящей работе [10], а результаты исследований приведены в таблице 3.13 и на графиках рисунка 3.9.

Таблица 3.13 – Параметры пористости, размер дендритной ячейки и размер зерна по сечению темплетов

Зона отбора образцов	Расстояние от прокатной поверхности, мм	№ образца	Мах линейный размер одиночной поры, мкм			Мах линейный размер очага, мкм			Объемная доля пор, %	Размер зерна, мкм	Размер дендритной ячейки, мкм	
			длина	ширина	среднее	длина	ширина	среднее				
5052	горячий слиток	30	25	25	11	18	43	7	25	0,007	101	32
		170	26	82	25	54	44	18	31	0,041	133	66
		280	27	55	12	34	63	43	53	0,025	136	92
	холодный слиток	30	28	53	19	36	62	60	61	0,092	102	33
		170	29	109	33	71	190	70	130	0,170	140	50
		280	30	162	70	116	112	99	106	0,150	132	91
AMг2	горячий слиток	30	47-1	38	12	25	32	15	24	0,020	114	31
		170	47-2	55	24	39	40	7	24	0,020	149	49
		280	47-3	48	23	36	57	30	44	0,040	131	90
	холодный слиток	30	48-1	38	20	29	62	16	39	0,020	121	30
		170	48-2	185	42	114	208	154	181	0,080	142	61
		280	48-3	141	41	91	104	40	72	0,020	118	73



а



б

Рисунок 3.9 – Параметры пористости, размера зерна и дендритной ячейки в объеме КГПС из сплавов 5052 (а) и АМг2 (б)



Графическая зависимость параметров пористости сплавов от размера зерна и дендритной ячейки показана на рисунках 3.10 и 3.11. Характерная пористость КГПС показана на рисунках 3.12 и 3.13, размер зерна – на рисунке 3.14.

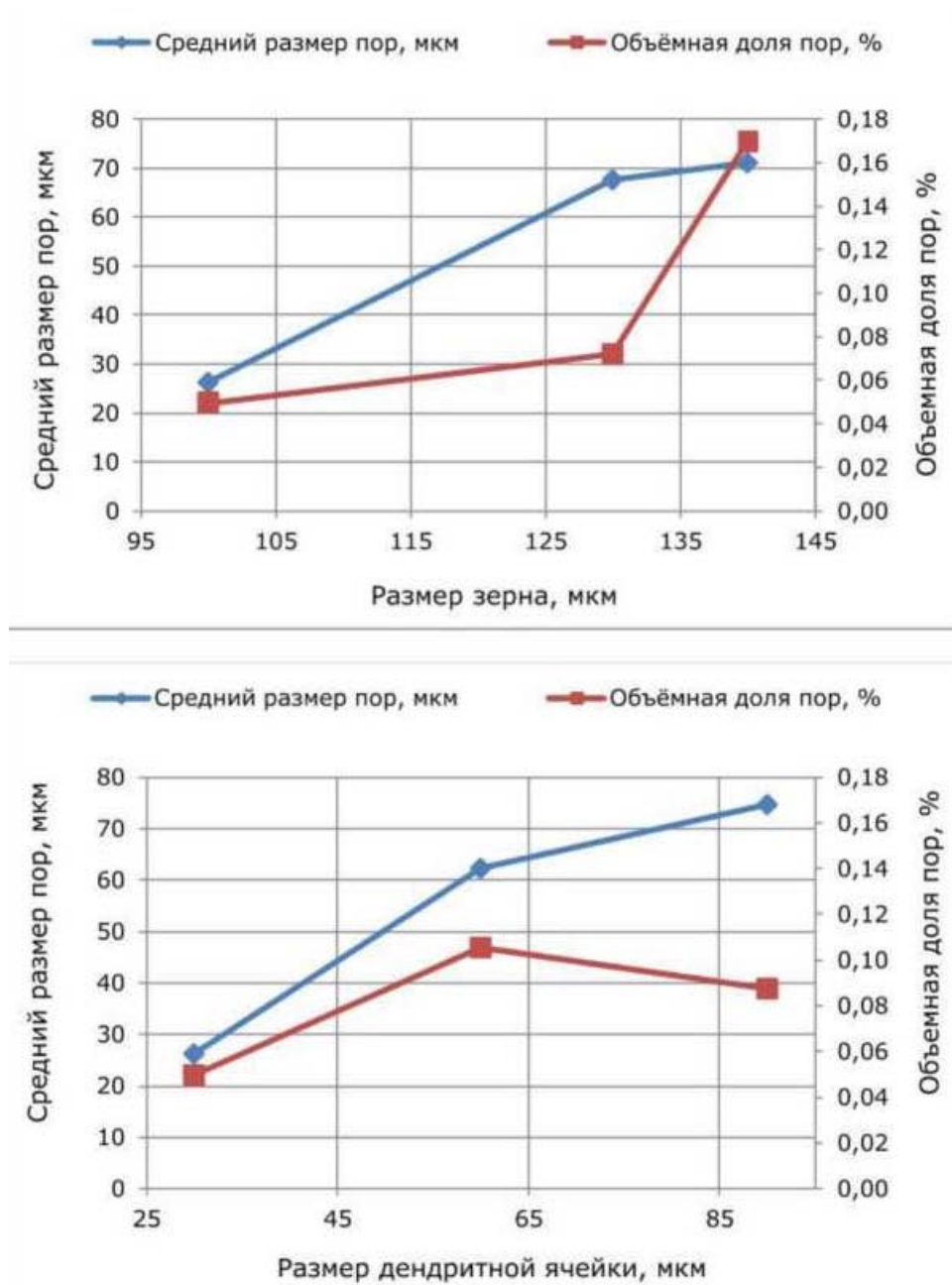


Рисунок 3.10 – Параметры пористости в зависимости от размера зерна и дендритной ячейки в объеме КГПС из сплава 5052

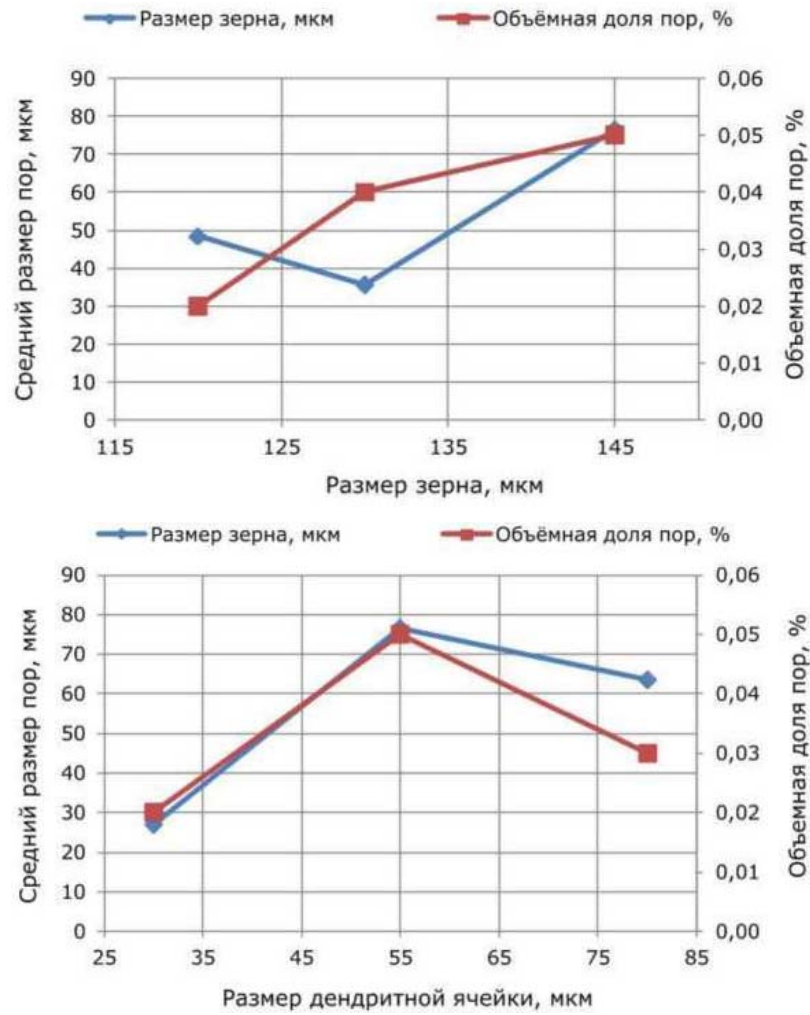


Рисунок 3.11 – Параметры пористости в зависимости от размера зерна и дендритной ячейки в объеме КГПС из сплава АМг2

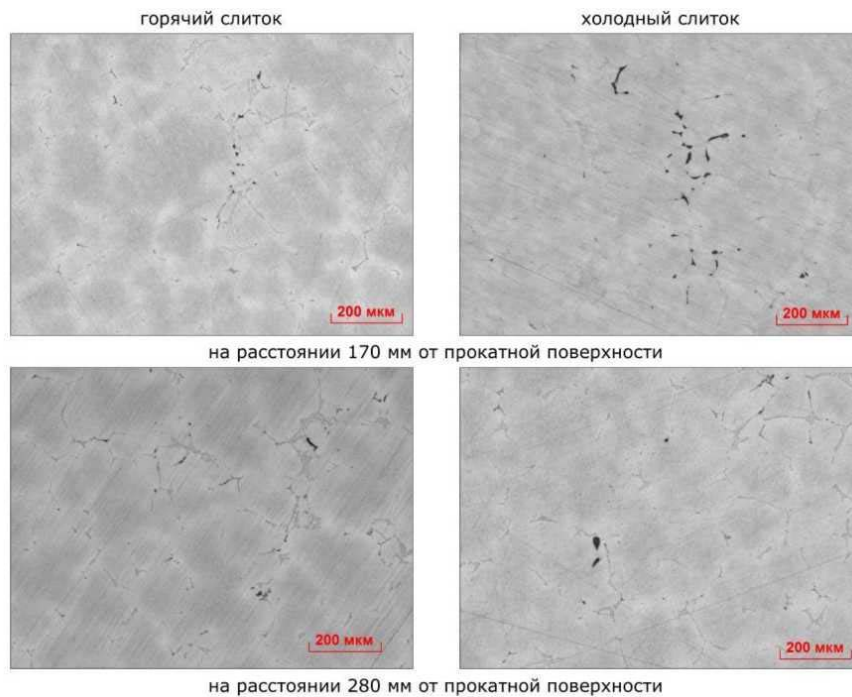


Рисунок 3.12 – Характерная пористость КГПС сплава АМг2

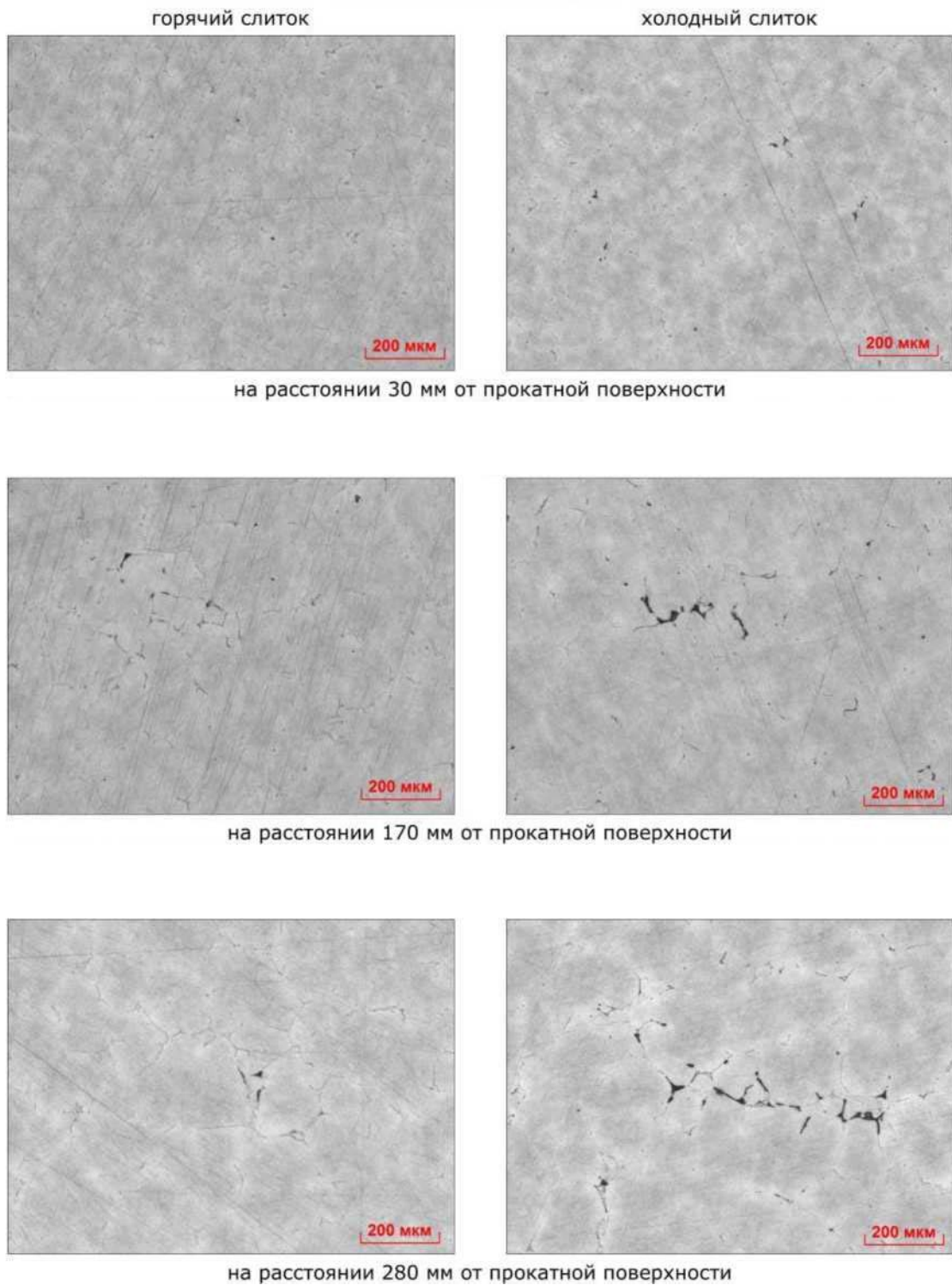


Рисунок 3.13 – Характерная пористость КГПС сплава 5052



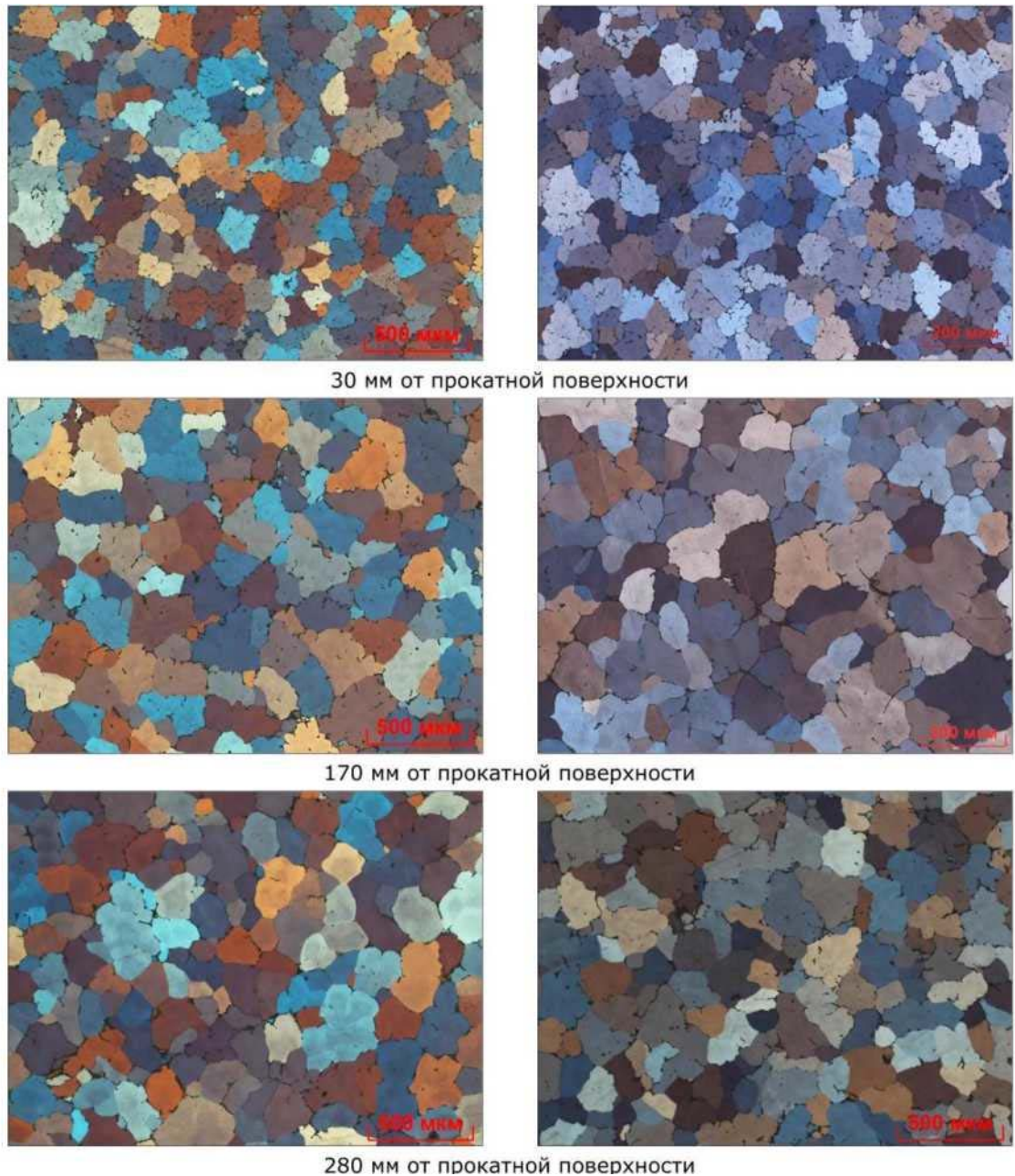


Рисунок 3.14 – Размер зерна холодного слитка в объеме КГПС из сплавов 5052 (слева) и АМг2 (справа)

Количественная оценка пор в структуре слитков показала, что в донной части холодных и горячих слитков сплава 5052 и АМг2 на расстоянии 30 мм от прокатной поверхности средний размер максимальных единичных пор находится в диапазоне 20...35 мкм. В этой зоне максимальная объемная доля пор – 0,09 % наблюдается в холодном слитке сплава 5052. Размер зерна в слитках сплава АМг2 больше на ~ 15 мкм по сравнению со слитками сплава 5052 [10].

В горячих слитках обоих сплавов на расстоянии 170 и 280 мм от прокатной

поверхности параметры пористости значительно меньше, чем в холодных, размер пор не превышает требования – 60 мкм и несколько увеличен на расстоянии 170 мм. В холодных слитках обоих сплавов размер пор превышает требования, составляет 71...116 мкм в сплаве 5052 и 114...91 мкм в сплаве АМг2 на расстоянии 170 и 280 мм от прокатной поверхности [10].

В горячих слитках обоих сплавов размер зерна на расстоянии 170 и 280 мм от прокатной поверхности существенно не отличается, размер дендритной ячейки увеличивается от поверхности к центральной части слитков. Установлено, что с ростом размера зерна более 120 мкм и дендритной ячейки более 50 мкм средний размер пор увеличивается и превышает 60 мкм в сплаве 5052 (рисунок 3.10). В КГПС сечением 600x1630 из сплава АМг2 увеличение размера пор более 60 мкм происходит при увеличении размера зерна более 130 мкм и дендритной ячейки более 45 мкм (рисунок 3.11).

Таким образом, при исследовании параметров пористости в структуре донной части КГСП сечением 600x1630 мм из сплава 5052, отлитых по действующей технологии в соответствии ТС 440-01-113 ред.2 и сплава АМг2, отлитых по ТУ 150.02.01.04-2019 после внесения изменений в техпроцесс установлено:

1. В горячих слитках сплавов 5052 и АМг2 пористость не превышает 60 мкм, максимальный размер пор несколько увеличен на расстоянии 170 мм от прокатной поверхности.

2. В холодных слитках сплавов 5052 и АМг2 пористость более грубая, чем в горячих слитках, превышает требования на расстоянии 170 и 280 мм от прокатной поверхности.

3. При проведении анализа влияния размера зерна на параметры пористости установлено, что увеличение среднего размера пор свыше 60 мкм в слитках сплава 5052 происходит, если размер зерна составляет больше 120 мкм, а размер дендритной ячейки должен быть более 50 мкм, а в слитках сплава АМг2 происходит, если размер зерна составляет более 130 мкм, а размер дендритной ячейки составляет более 45 мкм.

### 3.3 Выводы по главе 3

1. Создана компьютерная модель образования пористости при полунепрерывном литье КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии с использованием программного комплекса ProCAST.

2. Результаты проведенного компьютерного моделирования позволили установить следующие закономерности:

- пористость увеличивается от периферии слитка к центру;
- пористость возрастает с увеличением уровня расплава в кристаллизаторе и скорости литья;

3. Количественный анализ сравнительных исследований пористости в объеме КГПС из сплавов 5XXX серии, проведенных в условиях ОК РУСАЛ, подтвердил установленные выше закономерности и дополнил их следующим:

- параметры пористости практически линейно зависят от размеров зерна и дендритной ячейки слитков;
- в доннике горячего и холодного слитка размер очагов пор всегда меньше, чем в литнике;
- во всех объемах холодного слитка средний размер пор больше, чем горячем;
- 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 наблюдается 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.

4. 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. 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...280 мкм) и не соответствует требованиям потребителей по размеру единичных микропор (не более 60 мкм) и очагов пор (не более 300 мкм).

## **ГЛАВА 4 НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОРИСТОСТИ В ОБЪЕМЕ КГПС ИЗ СПЛАВОВ 5XXX СЕРИИ**

В главе приводится описание новых технических и технологических решений (новизна которых защищена патентами), направленных на дальнейшее усовершенствование технологии производства КГПС. Основное содержание главы опубликовано в следующих работах [10, 89, 90, 101–105].

### **4.1 Разработка и внедрение технологии производства КГПС из алюминиевых сплавов 5XXX серии с регламентированным размером пор**

На основе проведенных экспериментальных работ и теоретических исследований были установлены закономерности, которые были учтены при разработке и внедрении эффективной технологии в условиях ОК РУСАЛ для снижения пористости в объеме КГПС из сплавов 5XXX серии с регламентированным средним размером пор менее 60 мкм и с мелкозернистой структурой, отвечающие всем основным мировым требованиям по качеству. Действующая технология литья КГПС была скорректирована по следующим параметрам:

- 1) увеличить расход модифицирующей лигатуры до 2,5 кг/т;
- 2) увеличить расход аргона в SNIF P-180 до 7,5 нм<sup>3</sup>/ч и хлора до 0,13 нм<sup>3</sup>/ч;
- 3) увеличить скорость вращения ротора SNIF P-180 до 540 об/мин;
- 4) уменьшить скорость литья на 10 мм/мин;
- 5) поднять уровень расплава в кристаллизаторе на 10 мм;
- 6) обязательное рафинирование через установку HD-2000 с использованием рафинирующего гранулированного флюса марки Promag SI 1,5 кг/т при скорости вращения ротора 210 об/мин;
- 7) применение бесфосфатных пенокерамических фильтров вместо традиционных алюмофосфатных.



Литье партии КГПС из сплава 5083 для «PM S.p.A.» (Италия) сечением 600x2000x8000 мм происходило в литейном отделении металлургического завода ОК РУСАЛ с использованием следующего основного оборудования:

- миксеры (поворотные) с трубчатыми нагревателями емкостью 70 т, расположенными под сводом миксера и оснащенными донными МГД-перемешивателями;
- установка рафинирования расплава SNIF P-180UHB;
- металлофильтр «MITSUI», модель 2803;
- фильтрбокс для установки двух ПКФ сечением 584x584x50 мм с пористостью 50 ppi, производства Drahe;
- литейная машина «Wagstaff Shurcast»;
- кристаллизаторы типа «Epsilon», предназначенные для производства КГСП 5XXX серии.

При приготовлении сплава 5083 использовали следующие шихтовые и вспомогательные материалы:

- флюсовый препарат «Карналлитовый», производства ООО «ЭКОРАФ» по ТУ 0752-00129405798-2005;
- прутковый модификатор Al5Ti1B, производства Aleastur (Испания);
- прутковый модификатор Al3Ti1B, производства Aleastur (Испания);
- лигатура Cr80F20, производства ООО «Орион Спецсплав Гатчина» (Россия);
- марганец металлический, производитель «GLOBAL METAL» (КНР);
- магний первичный Mg-90 в Т-обр. слитках, производства СМЗ (Россия);
- картридж для «MITSUI» - марки RB, производства «MITSUI» (Япония), по договору поставки.

Подачу Al3Ti1B осуществляли в два места: 50% перед SNIF (входной портал) и 50% после SNIF (выходной портал) с общим расходом 2,0 кг/т.

Подачу Al5Ti1B осуществляли также в два места: 50% перед PTF и 50% после PTF с общим расходом 0,5 кг/т.

В процессе приготовления проводили дегазацию расплава в миксере с использованием специальной установки HD-2000 по режимам: скорость вращения ротора - 250 об/мин., время дегазации 10 минут с расходом аргона 12,0 м<sup>3</sup>/час, расход гранулированного флюса марки Promag SI с расходом 1,5 кг/т; с дополнительным снятием шлака с поверхности расплава после обработки. Затем происходил отстой расплава в миксере в течение 40 мин [4, 5].

Изготовление слитков осуществлялось на литейной машине с применением оснастки Wagstaff на кристаллизаторе Epsilon. При этом одновременно получали четыре слитка. Параметры литья указаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технологические параметры литья

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 <sup>3</sup> /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	

Фактический химический состав и содержание водорода КГПС из сплава 5083 опытных плавок представлены в таблице 4.2.

Проведенный металлографический анализ чистоты металла методом PoDFA-f выявил некоторое повышение коэффициента «загрязненности» расплава до  $N_{20} = 5$ . Это, в свою очередь, можно объяснить повышенным расходом лигатуры. Содержание неметаллических включений соответствовало требованиям к КГПС из сплава 5083.

Для анализа макро- и микроструктуры вырезали темплеты из центральной части слитка, параллельно короткой грани (рисунок 3.9) от предоставленных темплетов были вырезаны образцы согласно схеме рисунка 3.12, на расстоянии 30 (зона сечения 1), 170 (зона сечения 2) и 280 мм (зона сечения 3) от прокатной по-

верхности слитка. Отбор темплетов для исследования микропористости проводился от центральной части литника и донника горячего и холодного слитков опытных плавок.

Таблица 4.2 – Фактический химический состав плавок, %

Номер плавки/ТС440-01-136	Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Zn	Cr	Na	Li	Pb+Cd+Hg	Содержание H <sub>2</sub> см <sup>3</sup> /100 г
Плавка 1	0,17	0,082	0,002	4,43	0,61	0,03	0,009	0,007	0,00005	0,00005	0,0015	0,14
Плавка 2	0,17	0,086	0,004	4,49	0,55	0,030	0,009	0,008	0,00005	0,00005	0,0015	0,07

Для подготовки образцов и анализа макро- и микроструктуры использовали следующее оборудование:

- шлифовально-полировальный станок Struers Tegamin-30;
- инвертированный металлографический микроскоп OLYMPUS GX71/GX51;
- программный комплекс металлографического анализа Thixomet.PRO, модуль «Определение микропористости сплавов 5XXX серии».

Методы исследований соответствовали СТО 04.02.040-2017 «Определение параметров пористости металлографическим методом» [10], и оценку размера зерна и дендритной ячейки проводили в соответствии с ASTM E112.

Размер единичных пор и очагов пористости оценивали на площади микрошлифов  $\sim 3 \text{ см}^2$ , объемную долю пор оценивали на площади  $1 \text{ см}^2$  [10].

Оценка максимального линейного размера единичных пор и очагов пор проводилась по среднему диаметру Фере (глава 2 настоящей диссертации).

Результаты количественного анализа исследований пористости представлены в таблице 4.3 и на графиках рисунков 4.1 – 4.7. Характерная микропористость КГПС из сплава 5083 показана на рисунках 4.8 и 4.9, а размер зерна – на рисунке 4.10.

Таблица 4.3 – Параметры пористости, размер дендритной ячейки и размер зерна по сечению темплетов от КГПС из сплава 5083

Зона отбора образцов	Расстояние от прокатной поверхности, мм	Единичная пора				Очаг пористости					Объёмная доля пор, %	Размер дендритной ячейки, мкм	Размер зерна, мкм		
		длина, мкм	ширина, мкм	среднее значение, мкм	площадь, мкм <sup>2</sup>	длина, мкм	ширина, мкм	среднее значение, мкм	площадь, мкм <sup>2</sup>	суммарная площадь пор, мкм <sup>2</sup>					
Плавка 1	горячий	Донник	30	37	20	28	389	174	76	125	13289	203	0,04	35	64
			170	150	56	103	1970	390	112	251	43846	4860	0,3	67	99
			280	157	118	137	4015	326	206	266	67101	5439	0,19	369	89
		Литник	30	30	20	25	221	151	51	101	7621	141	0,04	27	72
			170	135	85	110	4313	296	79	188	23318	2038	0,2	74	93
			280	148	82	115	2172	296	74	185	21781	1162	0,1	88	94
	холодный	Донник	30	40	9	25	176	141	71	106	10042	247	0,03	35	74
			170	164	78	121	3048	355	141	248	49912	5362	0,35	71	95
			280	123	44	83	2917	423	171	297	72347	6283	0,25	76	89
		Литник	30	37	34	36	797	154	74	114	11433	345	0,07	40	71
			170	129	82	105	2067	327	132	230	43132	4970	0,4	59	92
			280	141	93	117	3319	437	301	369	131620	4627	0,12	73	92
Плавка 2	горячий	Донник	30	33	9	21	106	125	52	88	6515	239	0,02	31	58
			170	133	40	87	1517	371	159	265	58932	4334	0,39	61	86
			280	89	62	75	1715	192	96	144	18393	1217	0,17	75	88
		Литник	30	36	17	26	201	101	38	70	3876	76,9	0,02	30	79
			170	166	73	120	3770	347	201	274	69727	2339	0,35	52	90
			280	141	45	93	2159	374	186	280	69395	3336	0,25	69	90
	холодный	Донник	30	57	37	47	1456	215	127	171	27422	510	0,1	41	63
			170	207	79	143	3737	442	129	286	56937	3397	0,46	56	86
			280	161	65	113	4329	433	191	312	82839	7125	0,28	59	85
		Литник	30	36	7	21	114	142	96	119	13582	374	0,02	29	65
			170	82	34	58	1210	323	135	229	43500	1207	0,2	55	77
			280	118	42	80	977	280	115	198	32308	1687	0,26	70	102

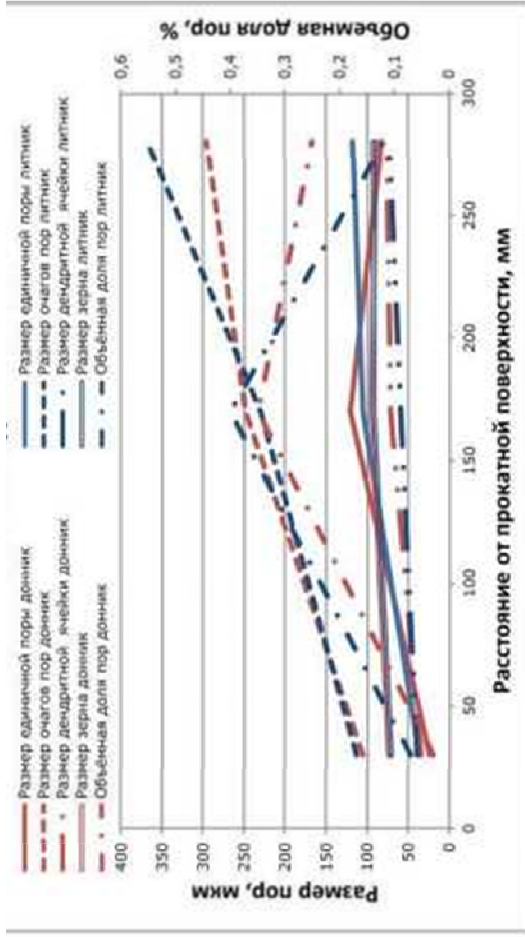


Рисунок 2. Параметры пористости, размер зерна и дендритной ячейки по сечению СП сплава 5083 пл.100136

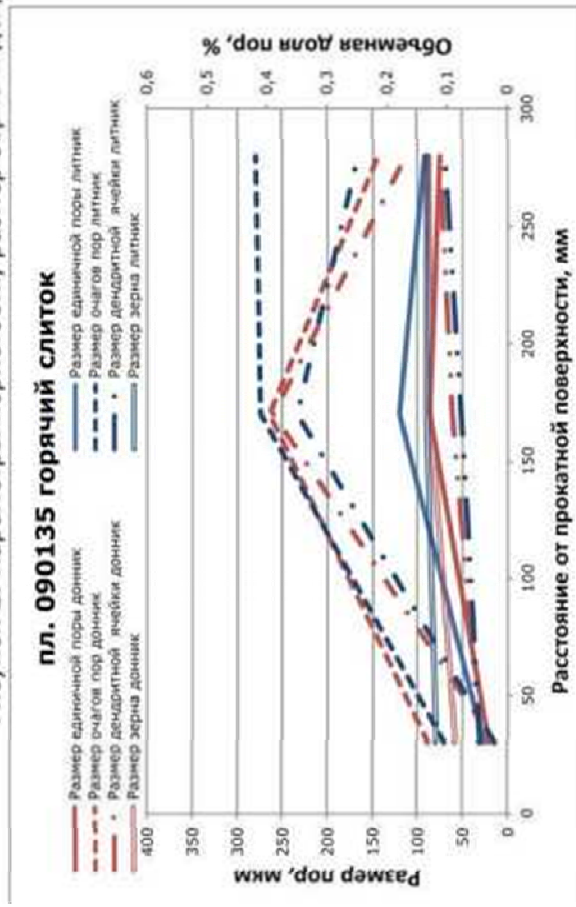
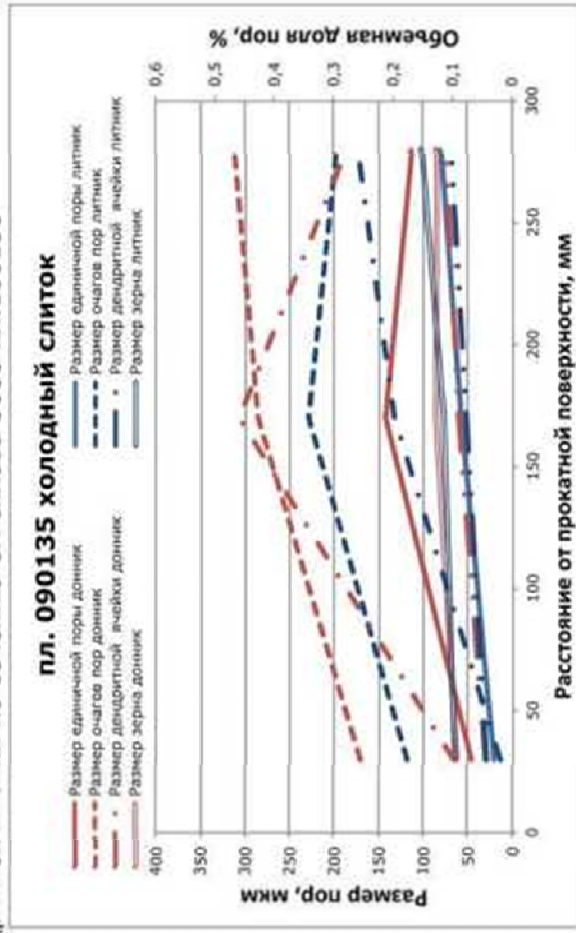
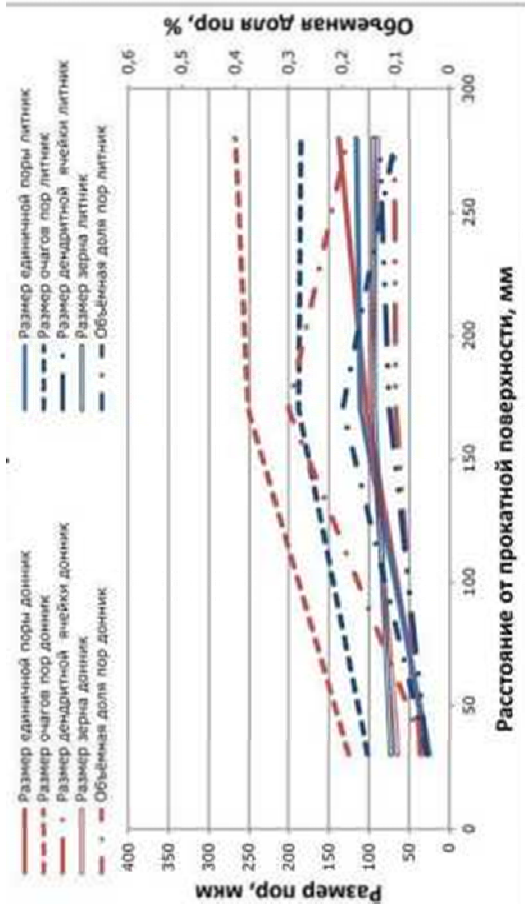


Рисунок 4.1 – Параметры пористости, размер зерна и дендритной ячейки по сечению КГПС из сплава 5083

пл. 1 (слева) и шавка 2 (справа)

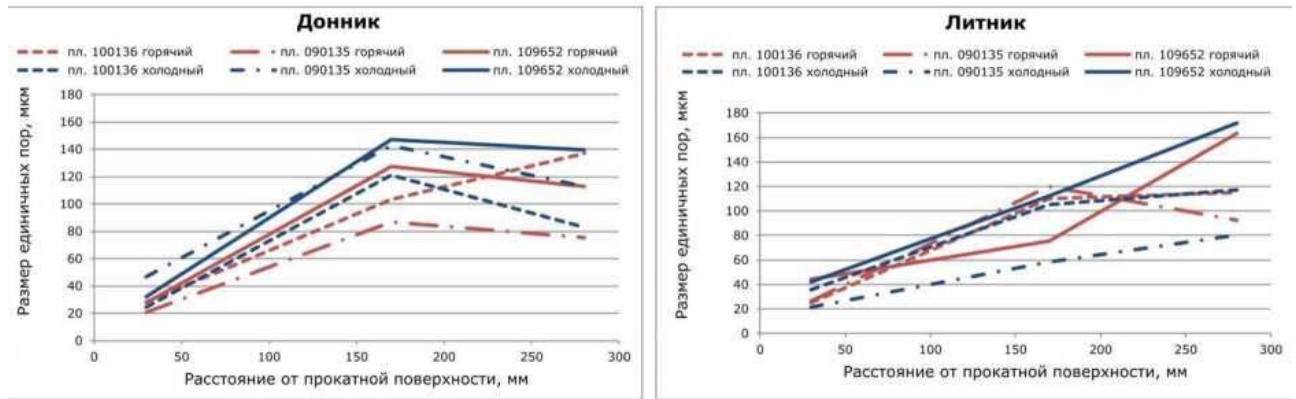


Рисунок 4.2 – Размер единичных пор по сечению КГПС из сплава 5083

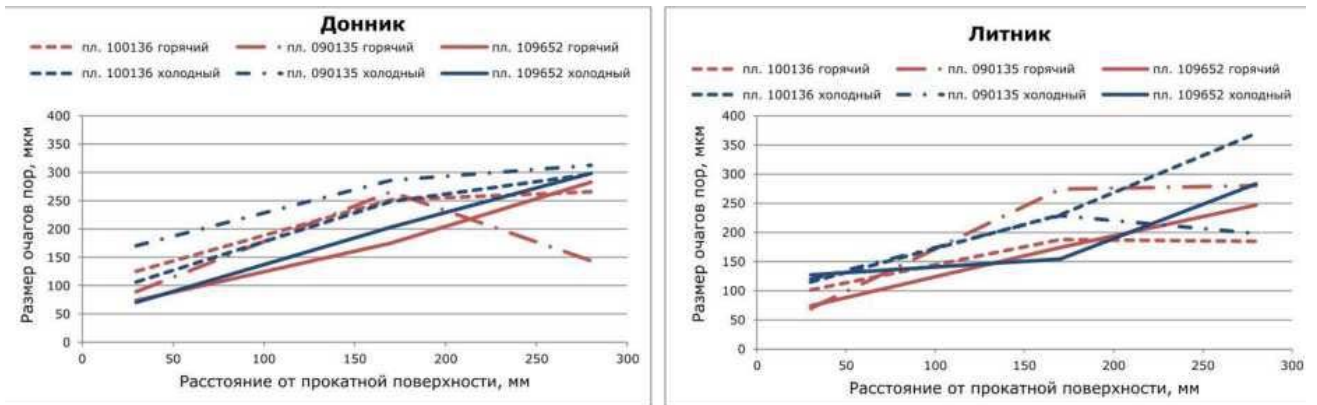


Рисунок 4.3 – Размер очагов пор по сечению КГПС из сплава 5083

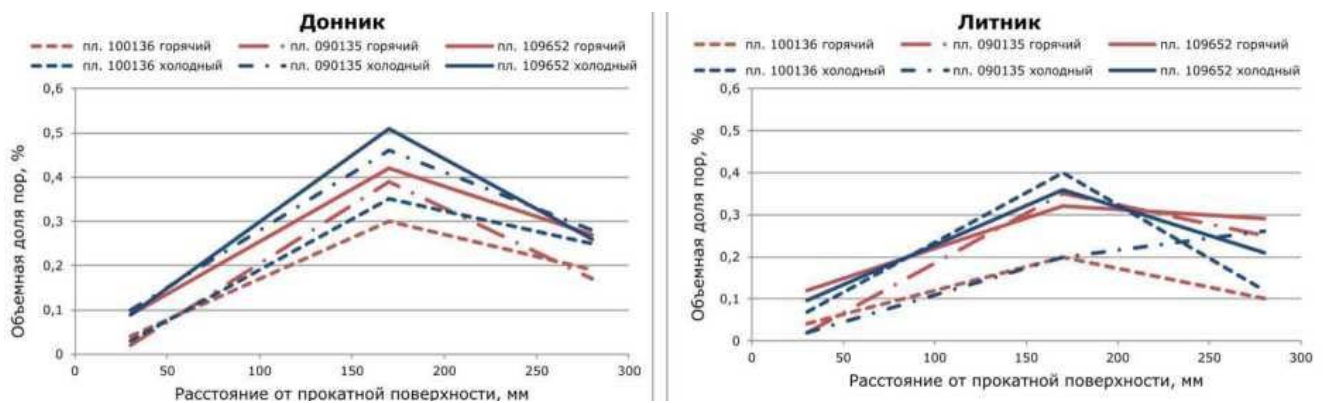


Рисунок 4.4 – Объемная доля пор по сечению КГПС из сплава 5083



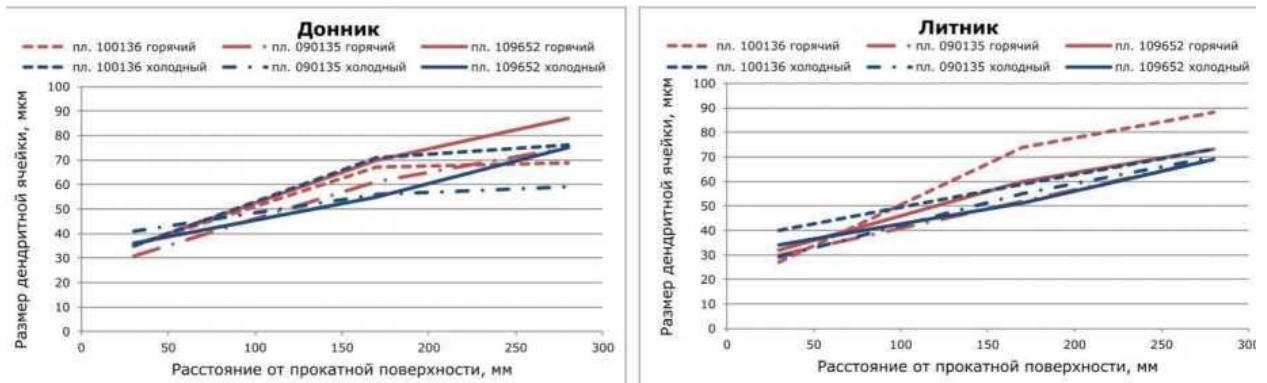


Рисунок 4.5 – Размер дендритной ячейки по сечению КГПС из сплава 5083

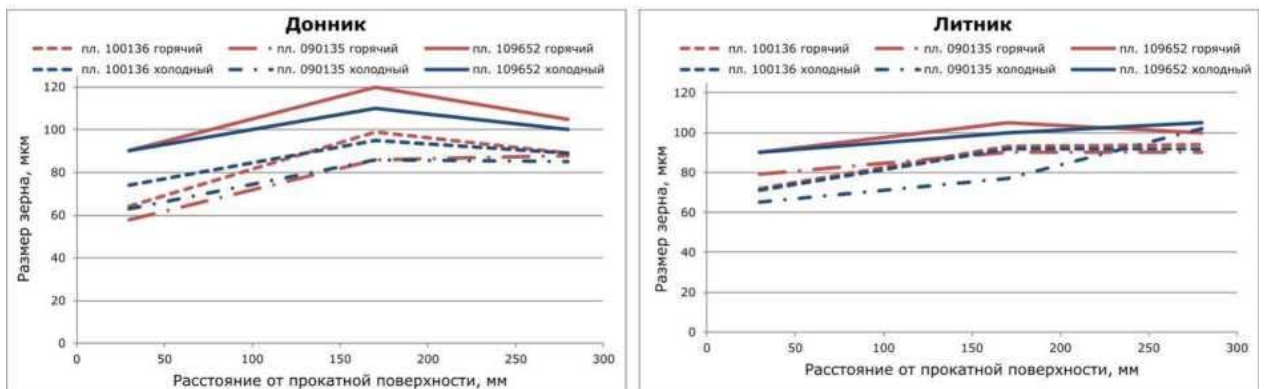
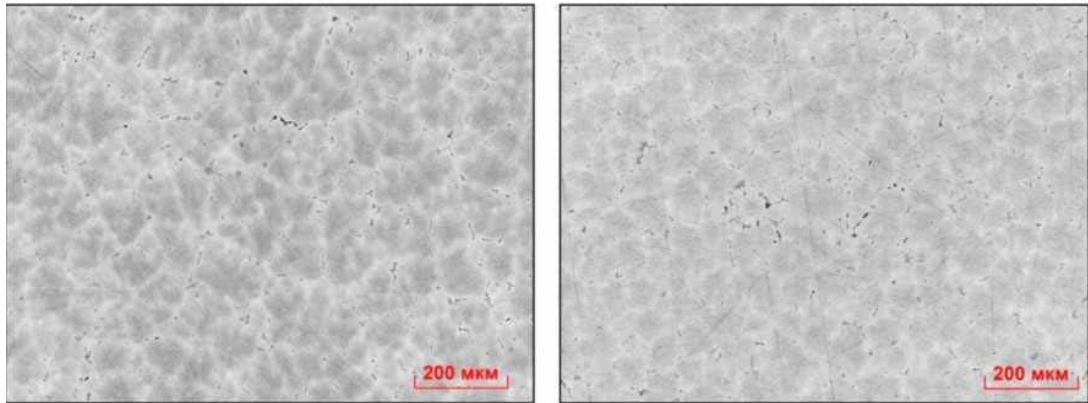


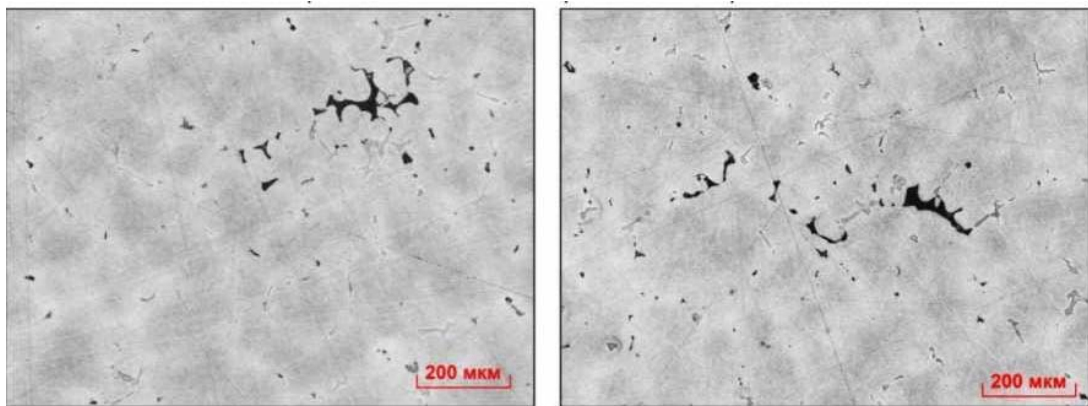
Рисунок 4.6 – Размер зерна по сечению КГПС из сплава 5083



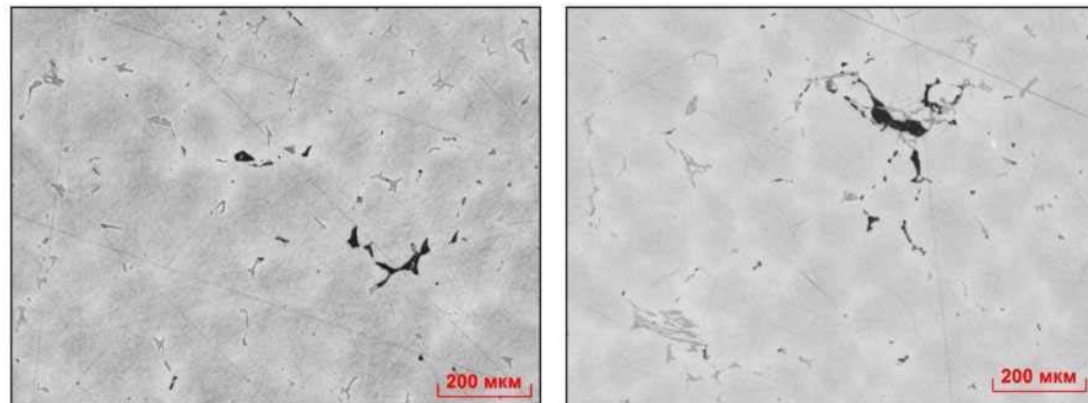
Рисунок 4.7 – Параметры пористости в зависимости от размера зерна КГПС



на расстоянии 30 мм от прокатной поверхности



на расстоянии 170 мм от прокатной поверхности



на расстоянии 280 мм от прокатной поверхности

Рисунок 4.8 – Максимальная микропористость в объеме КГПС сплава 5083



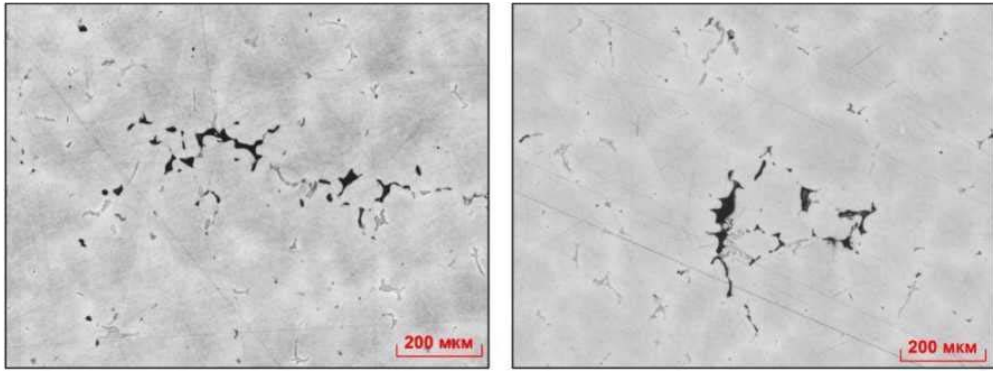


Рисунок 4.9 – Максимальные размеры очагов пор СП сплава 5083

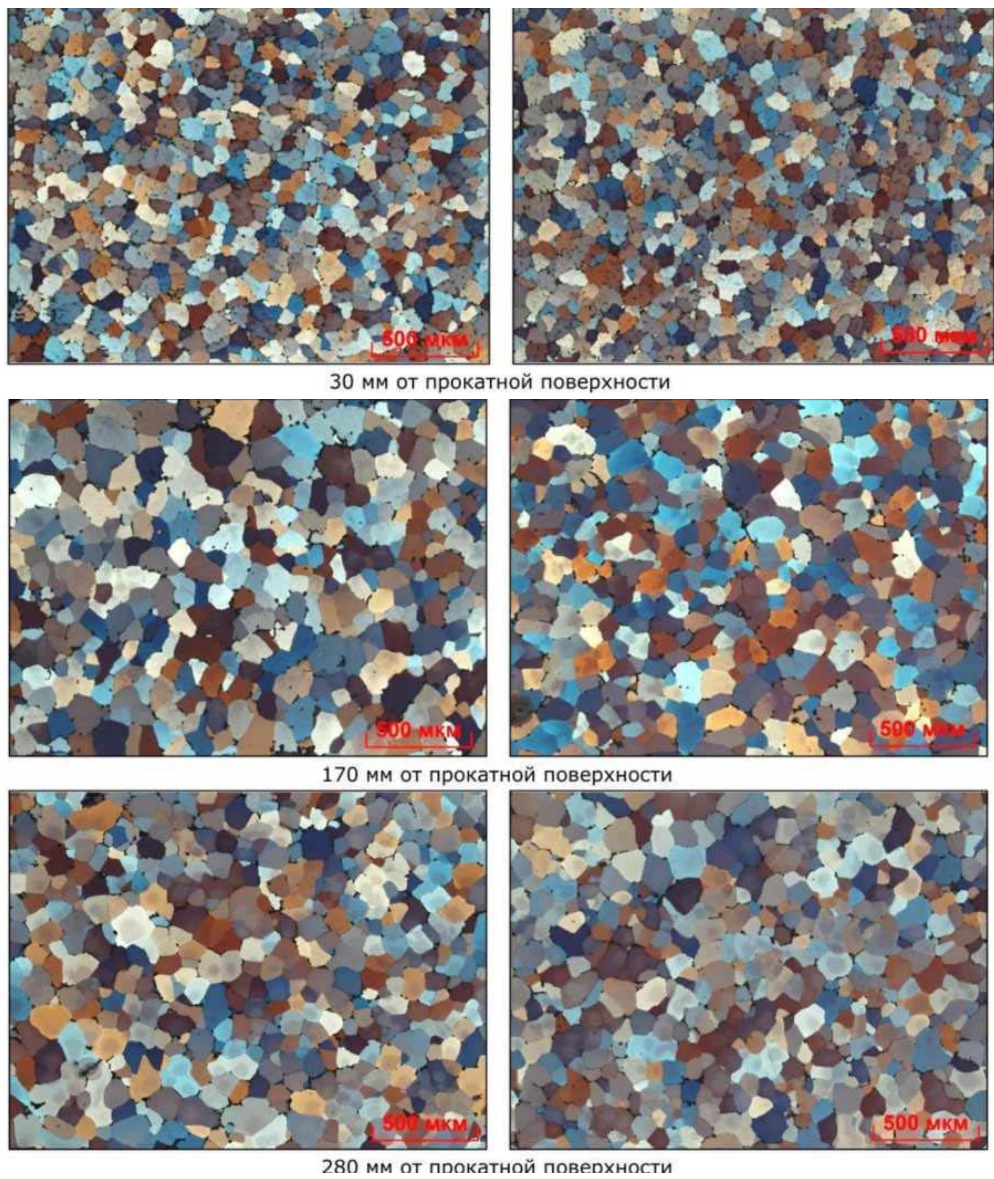


Рисунок 4.10 – Характерная зеренная структура в объеме КППС сплава 5083

На микроструктуре образцов, отобранных в зоне сечения 1, на расстоянии 30 мм от прокатной поверхности слитков обеих плавков, размер единичных пор составляет 21...47 мкм, размер очагов пор находится в диапазоне 70...171 мкм. По результатам оценки размеров единичных пор, очагов пористости и объемной доли пор, в данной зоне сечения наиболее грубая пористость выявлена в холодных слитках (донник пл. 1, литник пл. 2).

В образцах, отобранных в зоне сечения 2, на расстоянии 170 мм от прокатной поверхности, размер единичных пор в основном превышает предел 60 мкм. В донной части холодных слитков плавки 1 (100136) и плавки 2 (1090135) и литнике горячего слитка плавки 2 наблюдаются наиболее крупные единичные поры размером 120 и 143 мкм. Лишь в литниковой части холодного слитка плавка 2 максимальный размер пор находится на пределе требований и составил 58 мкм. Размер очагов пор в донной части слитков обеих плавков составляет 248...286 мкм, более крупный по сравнению с литниковой частью – 188...274 мкм. В донной части всех слитков объемная доля пор больше, чем в литниковой части. Объемная доля пор в сечении 2 во всех слитках увеличена на порядок по сравнению с зоной сечения 1 и в 1,5 раза по сравнению с зоной сечения 3.

В образцах, отобранных в зоне сечения 3, на расстоянии 280 мм от прокатной поверхности слитков, размер единичных пор превышает 60 мкм. В донной части слитков размер пор несколько уменьшен по сравнению с зоной сечения 2, в литниковой части практически не изменяется. Размер очагов пор в зоне сечения 3 всех слитков увеличен в донной части, а в литниковой части – сопоставим с размерами очагов в зоне сечения 2. В зоне сечения 3 объемная доля пор в литнике и доннике горячих слитков меньше, чем в холодных слитках.

Размер зерна во всех слитках минимальный на расстоянии 30 мм от прокатной поверхности, составляет 58...79 мкм. На расстоянии 170 мм и 280 мм от прокатной поверхности размер зерна больше – 80...100 мкм. Наиболее крупное зерно наблюдается в зоне сечения 2 в донниках горячего и холодного слитка плавки 1 (рисунок 4.10). Существенного различия по размеру зерна горячих и холодных слитков в исследуемых плавках не наблюдается. Размер дендритной ячейки в хо-

лодных и горячих слитках всех плавов, независимо от размера зерна, увеличивается от поверхности к центральной части (таблица 4.3).

Слитки плавов 1 и 2, отлитых с изменением параметров модифицирования, характеризуются меньшим размером зерна в исследуемых зонах сечения по сравнению со слитком плавки 1, отлитой по действующей технологии (рисунок 4.6). Изменение величины зерна привело к уменьшению размера единичных пор в литниковой части слитков на расстоянии 280 мм от поверхности и в донной части горячих слитков на расстоянии 170 мм от поверхности (рисунок 4.2). При этом размер очагов пор в литниках и донниках слитков опытных плавов на расстоянии 170 мм от прокатной поверхности больше, чем в слитке серийной плавки (рисунок 4.3). Однако, размер очагов превышает 300 мкм только в холодных слитках обоих плавов в зоне сечения 3. Объемная доля пор в донной части опытных слитков на расстоянии 170 мм от поверхности значительно снизилась (рисунок 4.4).

Проведенный анализ влияния размера зерна на параметры пористости в КГПС сплава 5083 показал, что размер единичных пор не превышает 60 мкм при размере зерна до 80 мкм (рисунок 4.7).

Следует отметить, что размер единичных пор и объемная доля пор практически линейно зависят от размера зерна КГПС (рисунки 4.11 и 4.12).

На основании проведенных исследований по определению параметров пористости в КГПС сечением 600x2000 мм сплава 5083, отлитых 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 прокатной 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.

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 обладают средним размером пор менее 60 мкм и удовлетворяют всем требованиям потребителей. Данные положения подтверждаются соответствующим Актом опытно-промышленных испытаний (Приложение А) 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» (Приложение Б).

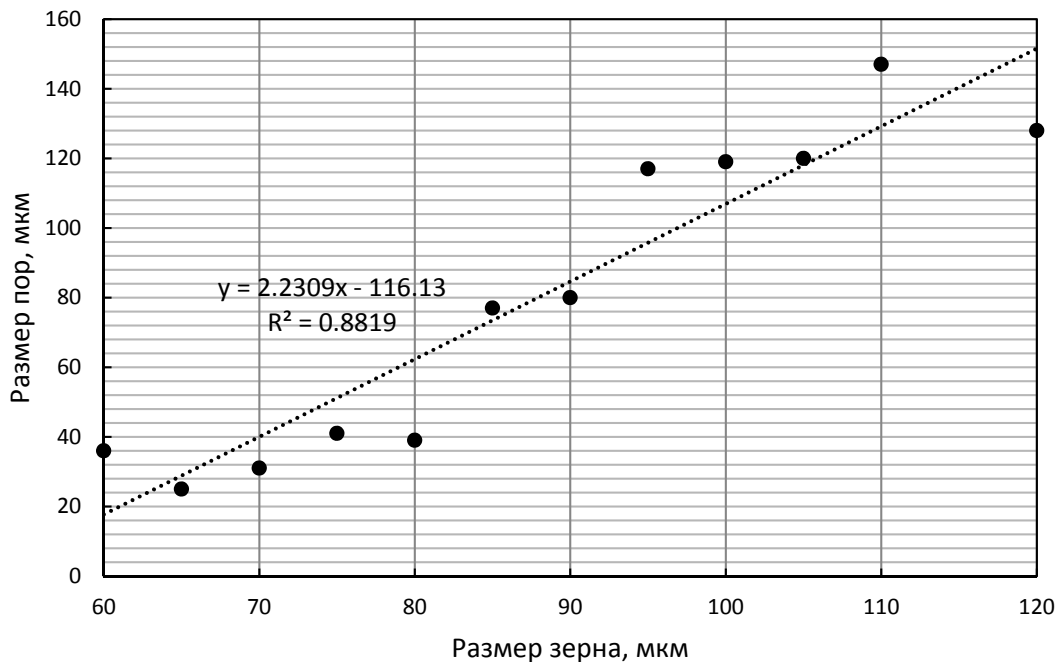


Рисунок 4.11 – Изменение размеров пор в зависимости от размера зерна КГПС

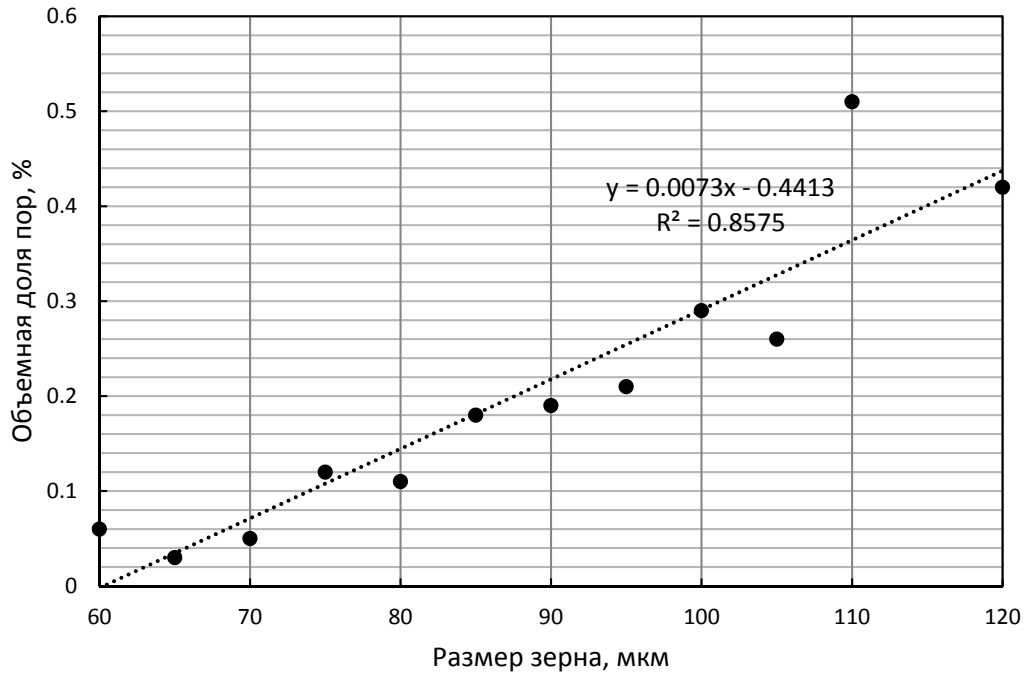


Рисунок 4.12 – Изменение объемной доли пор  
в зависимости от размера зерна КГПС

## 4.2 Новые технические решения в области производства КГПС

Для изготовления КГПС надлежащего качества из алюминиевых сплавов, изготавливаемых методом полунепрерывного литья, необходимо оперативно управлять термодинамическими условиями процесса кристаллизации, как скорость 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, техническую новизну которой подтверждает патент № 2697143 РФ [103].

Принципиальная схема разработанной установки представлена на рисунке 4.13, а на рисунке 4.14 показан разрез А-А.

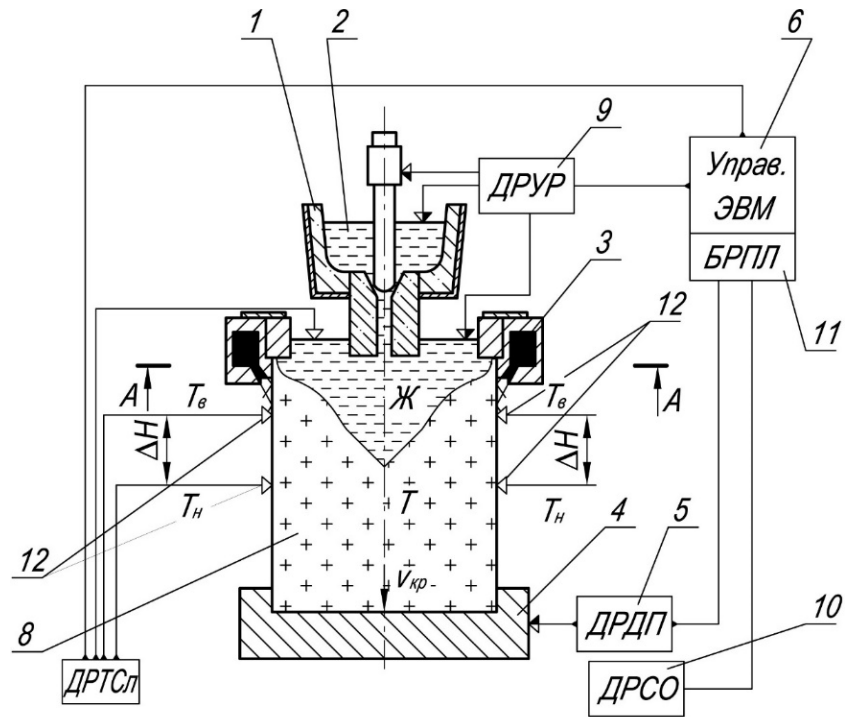


Рисунок 4.13 – Принципиальная схема установки для полунепрерывного литья КГПС по патенту РФ № 2697143 [103]

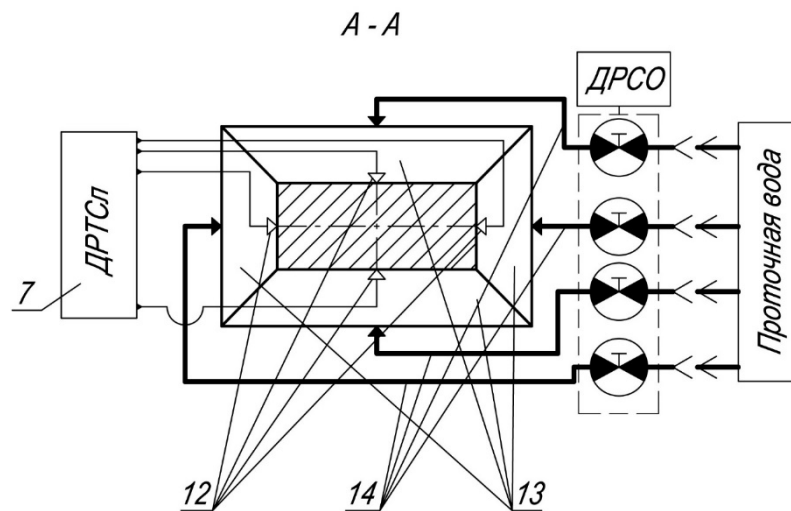


Рисунок 4.14 – Разрез А-А

Установка для полунепрерывного литья КГПС, включает устройство для подачи 1 расплавленного металла 2 в водоохлаждаемый кристаллизатор 3, поддон 4 с датчиком регулирования движения поддона (ДРДП) 5, управляющую ЭМВ 6,

связанную с датчиком регулятора температур (ДРТСл) 7 расплавленного металла 2 и слитка 8, скоростью движения поддона 4, с датчиком уровня (ДРУР) 9 расплавленного металла 2 в кристаллизаторе 3, с датчиками и регуляторами расхода воды (ДРСО) 10 для охлаждения кристаллизатора 3. Управляющая ЭМВ 6 снабжена БРПЛ 11, регистрирующим изменение поверхностной температуры слитка с помощью датчиков температур 12 по периметру и высоте в зоне охлаждения слитка 8, скорость движения поддона 4, расхода воды для охлаждения кристаллизатора 3, который разделен на изолированные друг от друга охлаждаемые секции 13, каждая из которых снабжена трубопроводами 14 для охлаждающей воды, взаимосвязанными регуляторами расхода воды (ДРСО) 10.

Установка работает следующим образом. Перед началом процесса литья нового типоразмера слитка 8 из алюминиевого сплава в управляющую ЭМВ 6 вводится массив конструктивных (размеры слитка и кристаллизатора), технологических (температуры расплавленного металла и скорость его подачи в кристаллизатор 3, температуры по периметру и высоте  $\Delta H$  поверхности слитка 8, температурный перепад  $\Delta T = T_B - T_H$  по высоте противоположных граней - он может отличаться для широких и узких граней; скорость движения поддона 4; уровень расплавленного металла 2 в кристаллизаторе 3;) и физико-химических (температуры ликвидуса и солидуса алюминиевого сплава; теплофизические свойства алюминиевого расплава, слитка и материала кристаллизатора) параметров процесса литья плоского слитка 8. Далее в блоке БРПЛ 11 корректируются математические модели охлаждения кристаллизации слитка 8 с учетом параметров системы охлаждения кристаллизатора 3 и слитка 8 в зоне охлаждения во время кристаллизации, а также изменение  $\Delta T$  на расстоянии по высоте между термопарами 12  $\Delta H$  в зависимости от расхода воды в каждую секцию 13 и скорости движения поддона 4, регистрируемой с помощью датчика ДРДП 5, и задается максимальное значение скорости охлаждения, исключая образование трещин в объеме слитка 8, которое определяется на основе экспериментальных данных для конкретных условий литья, а также скорости движения поддона 4 от уровня расплавленного металла 2 в кристаллизаторе 3.



Блок БРПЛ 11 позволяет определять значение температурного перепада в математической модели как динамически изменяемую величину на протяжении всего процесса литья слитка 8 и соблюдения равенства (или заданных значений температур на поверхностях слитка 8 по его высоте, что обеспечивается за счет регулирования расхода воды в каждую охлаждаемую секцию 13 кристаллизатора 3 с помощью ДРСО 10.

Во время процесса литья слитка 8 показания всех датчиков текущих значений передаются в блок интерфейса управляющей ЭВМ 6, который отображает его на экране пульта оператора (на рис. не показан).

Разработанная установка обеспечивает соблюдение одинаковых режимов охлаждения плоского слитка во время процесса кристаллизации по его периметру и высоте слитка, также определяет необходимый максимальный температурный перепад в зоне охлаждения по высоте слитка, исключающий образования таких дефектов в объеме слитка, как трещины, пористость и др. Данный температурный перепад регулируется за счет изменения интенсивности охлаждения с помощью изменения скорости расхода воды в секции кристаллизатора и выбором необходимой скорости движения поддона.

Кристаллизатор является основным элементом литейной оснастки, обеспечивающим форму и размер слитков, определяющим стабильность процесса и качество получаемых слитков. На рисунке 4.15 показаны литейный стол и кристаллизатор компании Wagstaff [3, 90].



Рисунок 4.15 – Литейный стол и кристаллизатор компании Wagstaff [3]



С помощью современных компьютерных технологий (рисунок 4.16), была разработана новая конструкция кристаллизатора, обладающая технической новизной, с возможностью установки на литейный стол «Wagstaff» и работы при тех же технологических параметрах (расход воды, температурно-скоростные условия литья, уровень расплава и др.) [90, 104].

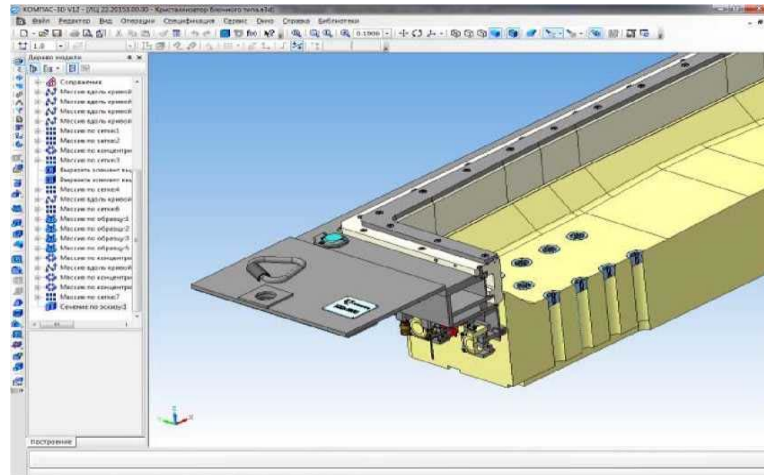


Рисунок 4.16 – Окно компьютерной модели литейной оснастки

Разработанная конструкция нового кристаллизатора принципиально отличается от известных аналогов и имеет более эффективную подачу жидкой смазки на рабочую поверхность кристаллизатора. Конструкция данного кристаллизатора, согласно патенту РФ № 2659548 [90, 104], представлена на рисунках 4.17 – 4.19.

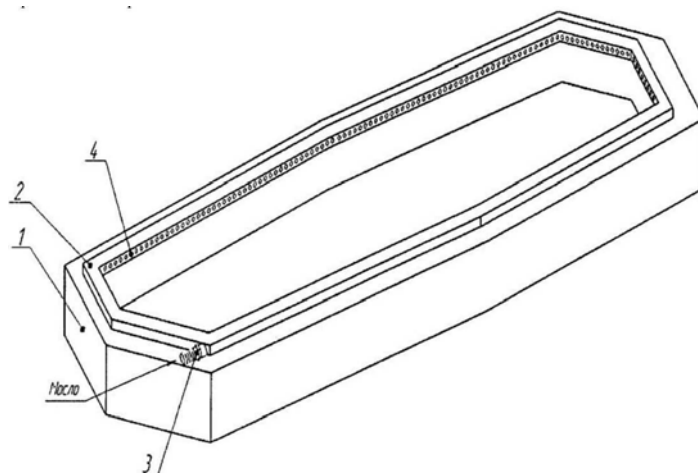


Рисунок 4.17 – Общий вид кристаллизатора: 1 – корпус кристаллизатора; 2 – крышка кристаллизатора; 3 – впускной патрубок устройства подачи смазки; 4 – выходные отверстия [90, 104]

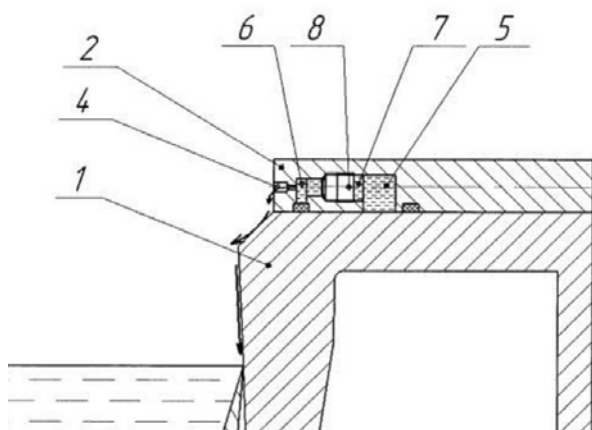


Рисунок 4.18 – Поперечный разрез кристаллизатора: 1 – корпус кристаллизатора; 2 – крышка кристаллизатора; 4 – выходные отверстия; 5 – проточка со стороны внешнего контура крышки; 6 – проточка со стороны внутреннего контура крышки; 7 – соединительные каналы; 8 – обратные клапаны [90, 104]

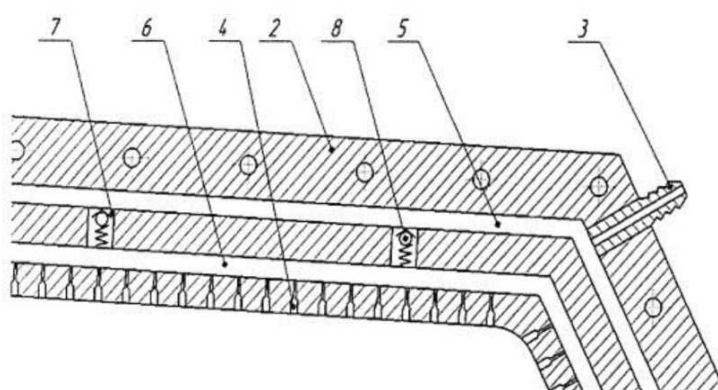


Рисунок 4.19 – Продольный разреза крышки кристаллизатора: 1 – корпус кристаллизатора; 2 – крышка кристаллизатора; 3 – впускной патрубков устройства подачи смазки; 4 – выходные отверстия; 5 – проточка со стороны внешнего контура крышки; 6 – проточка со стороны внутреннего контура крышки; 7 – соединительные каналы; 8 – обратные клапаны [90, 104].

Кристаллизатор содержит корпус 1 и крышку 2, в которой размещается устройство подачи смазки, включающее выпускной патрубков 3, выходные отверстия 4, проточку 5, выполненную со стороны внешнего контура крышки 2, проточку 6, выполненную со стороны внутреннего контура крышки, которые соединены между собой каналами 7. Соединительные каналы 7 включают гидравличе-

ские обратные клапаны 8. Выходные отверстия 4 располагаются на внутренней поверхности крышки с шагом 15...50 мм [90].

Разработанная конструкция данного кристаллизатора позволяет сократить время заполнения устройства смазкой за счет следующего – обратные клапаны 8 предотвращают преждевременное вытекание смазки из проточки 5; обеспечивают одинаковую подачу смазки из выходных отверстий 4 на рабочую поверхность корпуса 1 кристаллизатора; кроме того, происходит требуемое по времени удержание смазки в проточке 5 [90, 104].

Конструкция нового кристаллизатора, согласно патенту РФ № 182014 [105], представлена на рисунках 4.20 и 4.21.

Кристаллизатор содержит корпус 1 с выполненными внутри двумя камерами охлаждения. Первичная камера охлаждения 2 и вторичная камера охлаждения 3 разделены перегородкой, содержащей соединительный канал 4. В соединительном канале 4 установлен запорный клапан 5, выполненный в виде растягиваемого эластичного баллона [105].

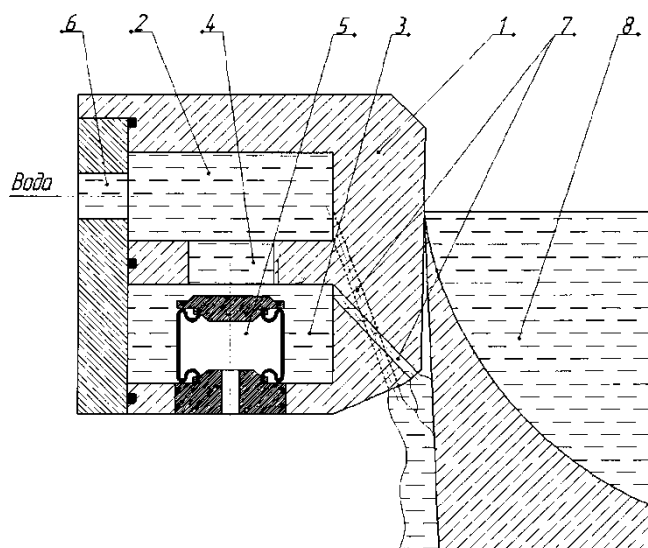


Рисунок 4.20 – Поперечный разрез корпуса кристаллизатора во время рабочего режима литья [105]: 1 – корпус кристаллизатора; 2 – первичная камера охлаждения; 3 – вторичная камера охлаждения; 4 – соединительный канал; 5 – запорный клапан; 6 – подводящий канал; 7 – отводящие каналы; 8 – формирующийся слиток [105]

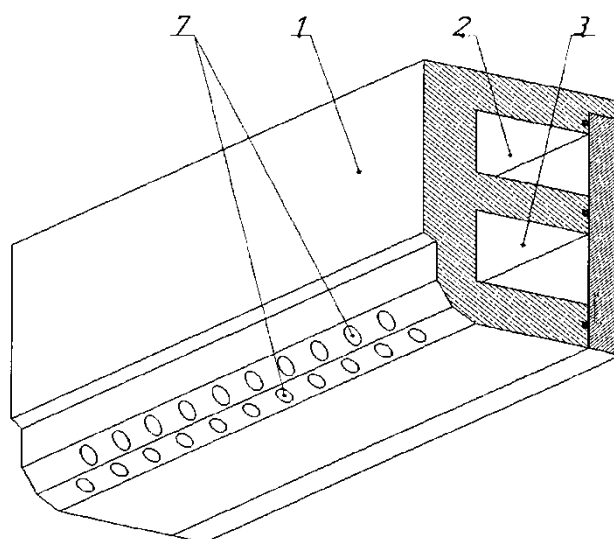


Рисунок 4.21 – Часть корпуса кристаллизатора [105]: 1 – корпус кристаллизатора; 2 – первичная камера охлаждения; 3 – вторичная камера охлаждения; 7 – отводящие каналы.

Известные существующие конструкции кристаллизаторов запорный клапан является механическим. Хладагент (обычно – вода) плохого качества вызывает образование ржавчины и накипи на поверхностях клапанов, поэтому они требуют периодической очистки и смазки. Механические клапаны обладают дефектами. Это прежде всего – усталостная деформация возвратной пружины, износ и задиры сопрягаемых поверхностей, высыхание и износ уплотнительных колец. В предлагаемой конструкции запорного клапана отсутствуют сопрягаемые металлические детали. Это исключает возможность заклинивания клапана и устраняет проблемы, связанные с необходимостью периодической его очистки и смазки [90, 105].

Подвод хладагента в первичную охлаждающую камеру 2 осуществляется через подводящий канал 6. Поступление хладагента воды во вторичную камеру охлаждения 3 осуществляется из первичной камеры 2 через соединительный канал 4. Из каждой камеры 2 и 3 выходит один ряд отводящих каналов 7, предназначенных для подачи хладагента на поверхность формирующегося слитка 8. Угол наклона, диаметр и количество отводящих каналов выбирается исходя из размеров отливаемого слитка и марки сплава [90, 105].

Расход хладагента регулируется в зависимости скорости литья и геометрических размеров слитка.

Разработанная конструкция созданного кристаллизатора [105], обеспечивая равномерное охлаждение кристаллизатора и поверхности слитка, существенно снижает величину деформации донной части слитка, является простой и надежной в работе [90, 105].

Отличием нового кристаллизатора является наличие специального коллектора, позволяющего применять сменную алюминиевую вставку [79, 90], которая является рабочей поверхностью (рисунок 4.22). Это позволяет значительно снизить эксплуатационные расходы.



Рисунок 4.22 – Составной кристаллизатор «РУСАЛ ИТЦ» с алюминиевой вставкой



а



б

Рисунок 4.23 – Отлитые слитки в литейной машине конструкции «Wagstaff» (а) и извлеченные из кристаллизаторов отлитые слитки (б) с помощью применения кристаллизатора «Epsilon» (слева) и кристаллизатора «РУСАЛ ИТЦ» (справа)

После изготовления комплекта литейной оснастки – кристаллизатора и поддона, сечением 560x1230 мм, было проведено изготовление опытной партии плоских слитков из сплава 5083, которая проводилась в условиях ОК «РУСАЛ» с использованием серийного всего остального оборудования. Далее исследовали полученное качество слитков. Результаты показаны в таблице 4.4. В этой же таблице для сравнения приведены результаты исследования слитков, изготовленных на литейном агрегате Wagstaff с кристаллизатором «Epsilon» (показан на рисунке 4.23).

Таблица 4.4 – Результаты исследования отлитых с помощью различных кристаллизаторов плоских слитков на внутренние дефекты [90]

Наименование характеристики	Ед. физ. вел.	Значение характеристики плоских слитков, отлитых с помощью кристаллизатора (количество, размер)	
		«Epsilon»	«РУСАЛ ИТЦ»
Раковины, трещины, газовые поры	штук (мм)	В корковой зоне присутствуют поры размерами до 0,4 мм	В корковой зоне присутствуют поры размерами до 0,3 мм
Инородные, шлаковые включения, окисные плены	штук (мм)	В корковой зоне присутствуют плены размерами до 1,0 мм - 10 штук, свыше 1,0 - 2 шт.	В корковой зоне присутствуют плены размерами до 1,0 мм - 7 штук, свыше 1,0 - нет
Плавающие кристаллы, веерная структура	штук (мм)	Отсутствуют	Отсутствуют
Елочная структура ( Fir Free) структура	мм	Отсутствует	Отсутствует
Глубина и равномерность краевой (корковой) зоны	мм	8	6
Размер зерен средней зоны (лунки) темплета	мкм	270	230
Размер зерен промежуточной зоны темплета	мкм	185	200
Размер зерен краевой зоны темплета	мкм	150	150
Средний размер зерен темплета	мкм	202	193
Средний размер пор	мкм	Менее 60	Менее 60
Содержание водорода	см <sup>3</sup> /100	Менее 0,15	Менее 0,15

Анализ полученных результатов показал, что изготовленные на новом кристаллизаторе слитки имеют более качественные показатели структуры по сравнению со слитками, изготовленными на кристаллизаторе «Epsilon» [90], и полностью удовлетворяют требованиям заводской технической спецификации, что позволило их отгрузить в качестве товарной продукции зарубежным потребителям.

### 4.3 Выводы по главе 4

1. Разработан новый технологический регламент для реализации технологии полунепрерывного литья КГПС из сплавов серии 5XXX с регламентированными параметрами пористости, что подтверждается соответствующим Актом опытно-промышленных испытаний (Приложение А) и отражено во разработанном и утвержденном ВТР 440.02.07.02 «Технологический регламент производства плоских слитков из сплавов серии 5XXX с размером пор не более 60 мкм», представленным в Приложении Б.

2. Разработаны новые технические решения:

- установка для непрерывного литья плоских слитков (Патент РФ № 2697143 С1, МПК В22D 11/055, В22D 11/16);
- кристаллизатор для литья алюминиевых слитков (Патент РФ № 2659548 U1, МПК В22D11/07, В22D11/04);
- кристаллизатор для литья алюминиевых слитков (Патент РФ на полезную модель № 182014 U1, МПК В22D11/055).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. 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  $0,10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  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  $40 \div 60 \text{ мм/мин}$  и уровня расплава в кристаллизаторе  $45 \div 57 \text{ мм}$  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 600x1630 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 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 «Тех-

нологический 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 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.

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 (Приложение В).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Напалков, В. И. Непрерывное литье алюминиевых сплавов / В. И. Напалков, Г. В. Черепок, С. В. Махов, Ю. М. Черновол. – М. : Интермет «Инжиниринг», 2005. – 512 с.
2. Гильманшина, Т.Р. Конструкции и принцип работы оборудования для изготовления слитков из алюминия и его сплавов. Атлас конструкции: учеб. пособие / Т.Р. Гильманшина, Л.И. Мамина, Н.Н. Довженко [и др.]. – Красноярск: СФУ, 2012. – 238 с.
3. Руководство Wagstaff по эксплуатации и техническому обслуживанию кристаллизаторов Epsilon™. – Wagstaff, Inc., 2003. – 260 с.
4. Фролов, В. Ф. Исследование и разработка новой технологии производства плоских слитков из алюминиевых сплавов 1XXX серии для фольгопрокатного производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04 / Фролов Виктор Федорович. – Красноярск. 2016. – 205 с.
5. Костин, И. В. Исследование и совершенствование процесса модифицирования плоских слитков из алюминиевых сплавов 5XXX серии : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04 / Костин Игорь Владимирович. – Красноярск. 2017. – 160 с.
6. Напалков, В. И. Легирование и модифицирование алюминия и магния / В. И. Напалков, С. В. Махов. – М. : МИСиС, 2002. – 376 с.
7. Напалков, В. И. Модифицирование алюминиевых сплавов: монография / В. И. Напалков, С. В. Махов, А. В. Поздняков. – М. : МИСиС, 2017. – 348 с.
8. Напалков, В. И. Лигатуры алюминиевые: структура и назначение: монография / В. И. Напалков, В. Н. Баранов, В. Ф. Фролов. – Красноярск : СФУ, 2019. – 176 с.
9. Напалков, В. И. Структура и дефекты слитков из алюминия и его сплавов: монография / В. И. Напалков, А. Е. Афанасьев, Б. В. Овсянников [и др.]. – Красноярск : СФУ, 2018. – 170 с.
10. Сидоров, А. Ю. Особенности формирования микропористости в крупногабаритных плоских слитках из алюминиевых сплавов 5XXX серии / А. Ю. Сидо-

ров, В. Б. Деев, В. Ф. Фролов [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2020. - № 3. – С. 338-342.

11. Михайлов, А. М. Литейное производство: учебник для металлургических специальностей вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А. М. Михайлов, Б. В. Буман, Б. Н. Благов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1987. – 256 с.

12. Добаткин, В. И. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах / В.И. Добаткин, Р. М. Габидуллин, Б. А. Колачев [и др.]. – М. : Металлургия, 1976. – 264 с.

13. Напалков, В. И. Физико-химические процессы рафинирования алюминия и его сплавов: монография / В. И. Напалков, С. В. Махов – М. : Lab Lambert Academic Publishing, 2015. – 576 с.

14. Белов, В. Д. Литейное производство: учебник / В. Д. Белов, М. В. Пикунов, Э. Б. Тэн [и др.]: под общ. ред. В. Д. Белова. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : МИСиС, 2015. – 487 с.

15. Курдюмов, А. В. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник / А. В. Курдюмов, В. Д. Белов, М. В. Пикунов [и др.]: под ред. В. Д. Белова. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: МИСиС, 2011. – 615 с.

16. Чернега, Д. Ф. Газы в цветных металлах и сплавах / Д. Ф. Чернега, О. М. Бялик, Д. Ф. Иванчук [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 176 с.

17. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебник для ВУЗов (4-е издание, переработанное и дополненное). М. : МИСиС, 2005. – 432 с.

18. Гельд, П. В. Водород и несовершенства структуры металла / П. В. Гельд, Р. А. Рябов, Е. С. Кодес. – М. : Металлургия, 1979. – 221 с.

19. Колачев, Б. А. Физико-механические свойства легких конструкционных сплавов / Б. А. Колачев, С. Я. Бецофен, Л. А. Бунин, В. А. Володин. – М. : Металлургия, 1995. – 288 с.

20. Никитин, В. И. Наследственность в литых сплавах / В. И. Никитин, К. В. Никитин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2005. – 476 с.

21. Деев, В. Б. Получение герметичных алюминиевых сплавов из вторичных материалов: монография / В. Б. Деев. – М. : Флинта : Наука, 2006. – 216 с.
22. Батышев, А. И. Производство отливок в автомобилестроении / А.И. Батышев, В. Д. Белов, К. А. Батышев [и др.]. – М. : МГОУ, 2011. – 205 с.
23. Костин, И. В. Устройство для исследования модифицирующей способности лигатур для алюминиевых сплавов / И. В. Костин. - Проспект свободный 2015: сб. материалов международной конференции. – Красноярск, 2015. – С. 32–36.
24. Беляев, С. В. Анализ содержания водорода на основных этапах изготовления плоских слитков из низколегированных алюминиевых сплавов / С. В. Беляев, Б. П. Куликов, В. Б. Деев [и др.] // *Металлург.* – 2017. – № 4. – С. 78–82.
25. Макаров, Г. С. Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования / Г. С. Макаров. – М. : Интермет Инжиниринг, 2011. – 528 с.
26. Бондарев, Б. И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов / Б. И. Бондарев, В. И. Напалков, В. И. Тарарышкин. – М. : Metallurgia, 1979. – 224 с.
27. Слетова, Н. В. Создание препаратов для рафинирования и модифицирования Al-сплавов, обеспечивающих стабильные показатели качества отливок : диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.04 / Слетова Наталья Владимировна. – Минск, 2014. – 185 с.
28. Пикунов, М. В. Плавка металлов, кристаллизация сплавов, затвердевание отливок / М. В. Пикунов. – М. : МИСиС, 2005. – 416 с.
29. Kurzydowski, K. J. The Quantitative, Description of the Microstructure of Materials / K. J. Kurzydowski, B. Ralph. – CRC Press, New York, – 1995. – 432 p.
30. Fox, S. Visualisation of oxide film defects during solidification of aluminium alloys / S. Fox, J. Campbell // *Scripta Materialia.* – 2000. – 43(10). – P. 881–886.
31. Carlson, K. Modeling the Effect of Finite-Rate Hydrogen Diffusion on Porosity Formation in Aluminum Alloys / K. Carlson, Z. Lin, C. Beckermann // *Metallurgical and Materials Transactions B.* – 2007. – 38(4). – P. 541–555.

32. Campbell, J. Castings. 2nd Edition / J. Campbell. - Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 2003. – 352 p.
33. Афанасьев, В. К. Водород и свойства сплавов алюминия с кремнием / В. К. Афанасьев, И. Н. Афанасьева, М. В. Попова и [др.]. - Абакан: Хакасское книжное изд-во, 1998. - 192 с.
34. Баландин, Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок. 2-е изд., перераб. и доп. / Г. Ф. Баландин – М. : Машиностроение, 1973. – 288 с.
35. Добаткин, В. И. Недендритная структура в слитках легких сплавов / В. И. Добаткин, Г. И. Эскин // Цветные металлы. – 1991. — №12. - С. 64-67.
36. Wagstaff, S. R. Defects during DC casting and their remediation [Электронный ресурс] / S. R. Wagstaff // Сборник тезисов докладов IX Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы» – Красноярск, 2017.
37. Wagstaff, S. R. Minimization of Macrosegregation in DC Cast Ingots Through Jet Processing / S. R. Wagstaff, A. Allanore // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2016. – 47(5). – P. 3132–3138.
38. Kashyap, K. T. Effects and mechanisms of grain refinement in aluminium alloys / K. T. Kashyap, T. Chandrashekar // Bulletin of Materials Science. – 2001. – Volume 24. – P. 345–353.
39. Nadella, R. Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys / R. Nadella, D. G. Eskin, Q. Du, L. Katgerman // Progress in Materials Science. – 2008. – Volume 53. – P. 421–480.
40. Springer, B. J. Ship repair of sensitized 5xxx series aluminum American Society of Naval Engineers / B. J. Springer, T. Burke [etc] // Virginia Beach, VA. Fleet Maint. Mod. Symp. – 2014. – P. 1–12.
41. Holroyd, N. J. H. Pre-exposure embrittlement of a commercial Al-Mg-Mn alloy, AA5083-H131 / N. J. H. Holroyd, T. L. Burnett, M. Seifi, J. J. Lewandowski // Corros. Rev. – 2017. – Vol. 35. – P. 275–290.
42. Crane, C. B. Stress corrosion cracking of Al–Mg alloy 5083 sensitized at low temperature / C. B. Crane, R. P. Gangloff, // Corrosion. – 2016. – Vol. 72. – P. 221–241.

43. Oguocha, N. A. Effect of sensitization heat treatment on properties of Al–Mg alloy AA5083-H116 / N. A. Oguocha, O. J. Adigun, S. Yannacopoulos // *J. Mater. Sci.* – 2008. – Vol. 43. – P. 4208–4214.
44. Zhang, R. The effect of reversion heat treatment on the degree of sensitisation for aluminium alloy AA5083 / R. Zhang, Y. Zhang, Y. Yan [etc] // *Corros. Sci.*, – 2017. – Vol. 126. – P. 324–333.
45. Bovard, F. S. Sensitization and environmental cracking of 5xxx aluminum marine sheet and plate alloys / F. S. Bovard, D. A. Shifler // Honolulu, Hawaii ECS Jt. Int. Meet. – 2004. – P. 232–243.
46. Zhang, R. Experiment-based modelling of grain boundary  $\beta$ -phase ( $\text{Mg}_2\text{Al}_3$ ) evolution during sensitisation of aluminium alloy AA5083 / R. Zhang, M. A. Steiner, S. R. Agnew [etc] // *Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7. – P. 1–14.
47. Seong, J. Corrosion inhibition of sensitized and solutionized AA5083 / J. Seong, G. S. Frankel, N. Sridhar, // *J. Electrochem. Soc.* – 2015 – Vol. 162. – P. 449–456.
48. Goswami, R. Microstructural evolution and stress corrosion cracking behavior of Al–5083 / R. Goswami, G. Spanos, P. S. Pao, R. L. Holtz // *Metall. Mater. Trans. A.* – 2011. – Vol. 42, – P. 348–355.
49. Yi, G. Sensitization prediction and validation for AA 5xxx Alloys exposed to long term cyclic and constant heating at low temperature / G. Yi, Z. Gaosong, Y. Zhu [etc] // *Corrosion.* – 2015. – Vol. 72. – P. 177–186.
50. Goswami, R. Transmission electron microscopic investigations of grain boundary beta phase precipitation in Al 5083 aged at 373 K (100 °C) / R. Goswami, R. Holtz // *Metall. Mater. Trans. A.* – 2013. – Vol. 44. – P. 1279–1289.
51. Holtz, R. Corrosion-fatigue behavior of aluminum alloy 5083-H131 sensitized at 448 K (175 °C) / R. Holtz, P. Pao, R. Bayles [etc] // *Metall. Mater. Trans. A.* – 2012. – Vol. 44 – P. 2839–2849.
52. Yan, J. Study of  $\beta$  precipitation and layer structure formation in Al 5083: The role of dispersoids and grain boundaries / J. Yan, A. M. Hodge // *J. Alloys Compd.* – 2017. – Vol. 703. – P. 242–250.

53. Seong, J. Influence of the altered surface layer on the corrosion of AA5083 / J. Seong, F. Yang, F. Scheltens [etc.] // *J. Electrochem. Soc.* – 2015. – Vol. 162. – P. 209–218.
54. Yi, G. Investigation of pre-existing particles in Al 5083 alloys / G. Yi, B. Sun, J. D. Poplawsky, Y. Zhu, M. L Free // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2018. – Vol. 740. – P. 461-469.
55. Seifi, M. Deformation rate and sensitization effects on environmentally assisted cracking of Al-Mg naval alloys / M. Seifi, N. J. H. Holroyd, J. J. Lewandowski // *Corrosion.* – 2016. – Vol. 72. – P. 264–283.
56. Gupta, R. K. Theoretical study of the influence of microalloying on sensitization of AA5083 and moderation of sensitization of a model Al-Mg-Mn alloy via Sr Additions / R.K. Gupta, R. Zhang, N. Birbilis // *Corrosion.* – 2014. – Vol. 70. – P. 402–413.
57. Yang, Y.-K. Determination of the  $\beta$  solvus temperature of the aluminum alloy 5083 / Y. -K. Yang, T. Allen, // *Metall. Mater. Trans. A.* – 2013. – Vol. 44. P. – 5226–5233.
58. Steiner, D. M. Predictive sensitization modeling for AA5XXX aluminum alloys including non-isothermal cases / D. M. Steiner, P. S. Agnew // *Corrosion.* – 2016.– Vol. 72. – P. 169–176.
59. Yi, G. Capillarity effect controlled precipitate growth at the grain boundary of long-term aging Al 5083 alloy / G. Yi, M. L. Free, Y. Zhu, A. Derrick // *Metall. Mater. Trans. A.* – 2014. – Vol. 45. – P. 4851–4862.
60. Technical Report IR08-042- Stabilisation of AA5XXX Alloys. Innoval Technology / Scamans, G. M – Oxon, U.K, 2008.
61. Beck, P.A. Effect of a Dispersed Phase on Grain Growth in Al-Mn Alloys / P. A. Beck, M. L. Holzworth, P. R. Sperry // *Transactions of AIME.* – 1949. – Vol. 180. – P. 163–192.
62. Birbilis, N. A survey of sensitisation in 5XXX series aluminium alloys / N. Birbilis, R. Zhang, S. P. Knight [etc] // *Corrosion.* – 2016. - Vol. 72. P. 144–159.



63. Brosi, J. K. Delamination of sensitized Al–Mg alloy during fatigue crack growth in room temperature air. / J. K. Brosi, S. M. Seifi, J. J. Lewandowski // Metall. Mater. Trans. A. – 2012. – Vol. 43A. – P. 3952–3956.
64. Aluminum. Properties and Physical Metallurgy. – N. Y. : ASM Metals park, 1984. – 450 p.
65. Brooks, C. L. Aluminum-Magnesium Alloy 5086 and 5456-H116 / C. L. Brooks // Naval Engineers Journal. – 1970. – Aug. – P. 29.
66. Coner, J. R. High Temperature Deformation of Aluminum-Magnesium Alloys at High Strain Rates / J. R. Coner, W. J. Tegart // Journal of the Institute of Metals. – 1969. – Vol. 97. – P. 73–76.
67. Mondolfo, L. F. Aluminum Alloys – Structure and Properties / L. F. Mondolfo. – Boston: Butterworths, 1976. – 982 p.
68. Hess, P. D Effects of Hydrogen on Properties of Aluminum Alloys / P. D Hess, G. K. Tumbull // Hydrogen in Metals, American Society for Metals. – 1974. P. 277–287.
69. Anderson, W. A. Influence of Service Temperature on the the Resistance of Wrought Aluminum-Magnesium Alloys to Corrosion / W. A. Anderson, M. B. Shumaker // Corrosion. – 1959. – Vol. 15. – P. 55–62.
70. Алиева, С. Г. Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. изд. / С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян [и др.]: 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1984. – 528 с.
71. Фридляндер, И. Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. – М.: Metallurgy, 1979. – 208 с.
72. Беляев, А. И. Metallovedenie алюминия и его сплавов: Справ.изд. 2-е изд., перераб. и доп. / А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов [и др.]. – М.: Metallurgy, 1983. – 280 с.
73. Алюминий: свойства и физическое материаловедение: Справ. изд. пер. с англ. / Под. Ред. Хэтча Дж.Е. – М. : Metallurgy, 1989. – 422 с.

74. Муратов, В. С. Формирование структуры и свойств цветных сплавов при термоупрочнении / В. С. Муратов, Е. А. Морозова. - М. : Машиностроение, 2006. – 320 с.

75. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справочник под ред. В. А. Ливанова. – М. : Машиностроение, 1974. – 432 с.

76. Телешов, В. В. Структура и свойства крупногабаритных полуфабрикатов из высокопрочных алюминиевых сплавов, используемых в авиастроении / В. В. Телешов, В. В. Захаров, Б. А. Копелович [и др.] // Технология легких сплавов. – 1983. – № 6. – С. 74–92.

77. Guo, J. Microporosity Simulations in Multicomponent Alloy Castings / J. Guo, M. Samonds // Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes X. – 2003. – P 303-310.

78. Monastyrskii, V. P. Simulation of microporosity in castings fabricated by directional solidification / V. P. Monastyrskii // Tepl. Prots. Tekh. – 2011. – 3 (1). – P. 20–27.

79. Zhu, J. D. Simulation of microporosity in A356 aluminium alloy castings / J. D. Zhu, S. L. Cockcroft, M. Daan, R. Maijer // International Journal of Cast Metals Research. – 2005. – 18(4). – P. 229-235.

80. Bondarenko, Y. A. Simulation of the temperature distribution on the mold surface and inside casting during high-gradient directional solidification / Y. A. Bondarenko, A. B. Echin, V. E. Bazhenov, A. V. Koltygin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2017. – 58(5). – P. 481–488.

81. Stepnov, A. A. Control over the Porosity of Plasma Sprayed Aluminum Oxide Parts by Heat Treatment / A. A. Stepnov, I. V. Belyaev, V. E. Bazhenov [etc] // Inorganic Materials. – 2019. – 55(12). – P. 1214–1222.

82. Skripalenko, M. M. Computer Simulation of Mannesmann Piercing of Aluminium Alloy Ingots / M. M. Skripalenko, B. A. Romantsev, V. E. Bazhenov [etc] // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2019. – 60(1). – P. 27–34.

83. Petrova, A. V. Prediction of Misruns in ML5 (AZ91) Alloy Casting and Alloy Fluidity Using Numerical Simulation / V. E. Bazhenov, A. V. Koltygin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2018. – 59(6). – P. 617–623.

84. Bazhenov, V. E. Determination of the heat-transfer coefficient between the AK7ch (A356) alloy casting and no-bake mold / V. E. Bazhenov, , A. V. Koltygin, Y. V Tselovalnik // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2016. – 57(7). – P. 686–694.

85. Skripalenko, M. M. Computer modeling of chain processes in the manufacture of metallurgical products / M. M. Skripalenko, V. E. Bazhenov, B. A. Romantsev [etc] // Metallurgist. – 2014. – 58(1–2). – P. 86–90.

86. Zhang, Q. Microporosity formation and dendrite growth during solidification of aluminum alloys: Modeling and experiment / Q. Zhang D. Sun S. Pan M. Zhu // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 146, – January. – 118838.

87. Hu, M. Modeling of gas porosity and microstructure formation during dendritic and eutectic solidification of ternary Al-Si-Mg alloys / M. Hu, T. Wang, H. Fang M. Zhu // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 76. – P. 76-85.

88. Abdullin, A. D. End-to-End Simulation of Casting and Metal-Forming Operations with ProCAST and Qform Software / A. D. Abdullin, A. A. Ershov // Metallurgist. – 2014. – 58 (5–6). – P. 339–345.

89. 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.

90. 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.

91. ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 2003.

92. ГОСТ 4784-2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. – М. : Стандартинформ, 2019.

93. G8 GALILEO. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/elemental-analyzers/cs-onh-analyzers/g8-galileo.html>.

94. Анализаторы водорода RH-402, RH-404, RH-600, RHEN-600, RHEN-602. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://td-str.ru/file.aspx?id=19940>.

95. ГОСТ 21132.1-98. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы определения водорода в твердом металле вакуум-нагревом. – М. : Изд-во стандартов, 1999.

96. ГОСТ 21132.0-75. Алюминий и сплавы алюминиевые. Метод определения содержания водорода в жидком металле. – М. : Изд-во стандартов, 2004.

97. ГОСТ Р 50965-96. Алюминий и сплавы алюминиевые. Метод определения водорода в твердом металле. – М. : Изд-во стандартов, 2004.

98. Belyaev, S. V. Analysis of Hydrogen Content in the Main Stages of from Low-Alloy Aluminum Alloy Flat Ingots Manufacture / S. V Belyaev, B. P. Kulikov, V. B. Deev [etc] // Metallurgist. – 2017. – № 4. – P. 78–82.

99. Belyaev, S. V. Saturation Dynamics of Aluminum Alloys with Hydrogen / S. V Belyaev, I. Y. Gubanov, B. P. Kulikov [etc] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 12. – No. 21. – P. 6243–6247.

100. Патент № 2659556 С1 Российская Федерация, МПК В22D 41/00 – № 2017120236. Вакуумный ковш для забора жидкого металла / Куликов Б.П., Баранов В.Н., Фролов В.Ф. [и др.]; заявл. 08.06.2017; опубл.: 02.07.2018 Бюл. № 19.

101. 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., Сидоров А.Ю. [и др.]; заявл. 29.06.2018; опубл.: 25.09.2018. Бюл. № 27.

102. Патент № 2665585 С1 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.

103. Патент № 2697143 С1 Российская Федерация, МПК В22D 11/055, В22D 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.

104. Патент № 2659548 U1 Российская Федерация, МПК В22D11/07, В22D11/04 – № 2017130078. Кристаллизатор для литья алюминиевых слитков / Сидоров А.Ю., Солдатов С.В., Пелевин А.Г. [и др.], заяв. 24.08.2017; опубл.: 02.07.2018. Бюл. № 22.

105. Патент на полезную модель № 182014 U1 Российская Федерация, МПК В22D11/055 – № 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.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ИЦМиМ – Института цветных металлов и материаловедения;

СФУ – ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»;

КГПС – крупногабаритный плоский слиток;

КС – кристаллизатор скольжения;

МПЛ – метод полунепрерывного литья;

ВТК – вакуум-транспортный ковш;

ЭМП – электромагнитное перемешивание;

ПКФ – пенокерамический фильтр;

МТФ – трубчатый металлофильтр тонкой очистки;

SNIF – установка внепечного рафинирования;

МЗС – мелкозернистая структура.

## Приложение А

### Акт о внедрении технических решений



УТВЕРЖДАЮ  
Директор Литейного центра  
ООО «РУСАЛ ИТЦ»

А.А. Старцев

03/03/2020

М.П.

#### АКТ

#### о внедрении технических решений по достижению среднего размера пор не более 60 мкм в плоских слитках из сплава 5083

В период с января 2019 по декабрь 2019 года соискатель кафедры «Литейное производство» ФГАОУ ВО «Сибирского федерального университета» Сидоров Александр Юрьевич участвовал в исследованиях, разработке и внедрении в производственный процесс технических решений по достижению среднего размера пор не более 60 мкм в плоских слитках из сплава 5083. Исследовал зависимости технологии плавления, рафинирования, литья расплава и технологических факторов на образование пор при производстве плоских слитков сплавов 5083, 5182.

#### Выполнены следующие работы:

1. Разработана технология и нормативно-технологическая документация на производство плоских слитков сплавов 5083, 5182 с размерами пор до 60 мкм;
2. Разработана методика по оценке размеров пористости в крупногабаритных плоских слитках алюминиевых сплавов серии 5XXX.
3. Произведена отливка квалификационных партий плоских слитков сечением 600x2000 мм сплава 5083 с размерами пор до 60 мкм по разработанному технологическому регламенту.

#### Достигнуты следующие результаты:

Полуфабрикаты, в виде плоских слитков произведенные по разработанной технологии, соответствовали техническим требованиям потребителя переработаны в конечную продукцию без замечаний.

#### Заключение комиссии:

1. Разработанная технология и нормативно-технологическая документация на производство плоских слитков сплавов 5083, 5182 с размерами пор до 60 мкм обеспечивает производство плоских слитков удовлетворяющих требованиям стандартов предприятия и заказчиков.
2. Признать разработанную технологию эффективной и готовой к внедрению на производство.
3. Ожидаемый среднегодовой экономический эффект от внедрения технологии при выпуске продукции 2 000 т/год составит 2,6 млн. руб./год.

Комиссия от ООО «РУСАЛ ИТЦ»

Директор Департамента литейных проектов Литейного центра

Фролов В.Ф.

Директор Департамента технологии литья Алюминиевых заводов

Дроздов В.Ф.

Менеджер Департамента литейных проектов Литейного центра

Костин И.В.

От ФГАОУ ВО «СФУ»  
Соискатель кафедры «Литейное производство»


Сидоров А.Ю.

## Приложение Б

### Технологический регламент

ВТР 440.02.07.02



УТВЕРЖДАЮ:  
 Директор ЛЦ ООО «РУСАЛ ИТЦ»  
  
 А.А. Старцев  
 « 9 » 12 2019г.

#### ВРЕМЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

Литейное производство

Технологические параметры литья плоских слитков 5XXX с требованием по размеру пор не более 60 мкм на литейной оснастке Wagstaff.

**ВТР 440.02.07.02**  
 Редакция 1

**Вводится впервые**

**Номер документа в СЭД: РИТЦ-РС-06701/19**

Согласовано:	Фамилия и инициалы	Дата
Директор ДТЛ ЛЦ ООО «РУСАЛ ИТЦ»	В.Ф. Дроздов	04.12.19
Директор ЛП ПАО «РУСАЛ Братск»	И.В. Бобков	09.12.19
Директор ЭОТиПБ ПАО «РУСАЛ Братск»	А.А. Гавриленко	05.12.19
Директор ДЛП ЛЦ ООО «РУСАЛ ИТЦ»	В.Ф. Фролов	04.12.19
Директор КД ПАО «РУСАЛ Братск»	Р.М. Набеев	09.12.19
Директор ДОК ЛЦ ИТЦ	В.В. Ротарь	09.12.19
Начальник ОС ДпТиТР АП ООО «РУСАЛ ИТЦ»	А.Е. Гриднев	05.12.19
Начальник ОТиПБ ПАО «РУСАЛ Братск»	А.Н. Емшанов	09.12.19
Начальник ОЛ ЛЦ БрАЗ ООО «РУСАЛ ИТЦ»	А.В. Данилов	05.12.19
Начальник СК ПАО «РУСАЛ Братск»	С.В. Шуин	05.12.19
Начальник ПИО ООО «РУСАЛ ИТЦ»	С.А. Панова	04.12.19
<b>Разработал:</b>		
Менеджер ДЛП ЛЦ ООО «РУСАЛ ИТЦ»	И.В. Костин	04.12.2019
Менеджер ДЛП ЛЦ ООО «РУСАЛ ИТЦ»	Н.Е. Лащухин	04.12.2019



## 1 Назначение и область применения

1.1. Настоящий временный технологический регламент определяет технологические параметры производства плоских слитков из алюминиевых сплавов 5XXX при производстве квалификационных партий на ЛА №10 в ЛО-3 ПАО «РУСАЛ Братск».

1.2. Требования настоящего технологического регламента распространяются на технологический персонал литейного производства, выполняющий операции процесса приготовления и литья плоских слитков 5XXX серии на ЛА №10 в ЛО-3 ПАО «РУСАЛ Братск».

1.3. Остальные параметры приготовления и литья плоских слитков не указанные в настоящем ВТР выполняются в соответствии с действующей нормативно-технологической документацией ТИ 440.02.07, ПУ 440.02.07.01 и технических спецификаций на товарную продукцию.

## 2 Нормируемые технологические параметры

2.1. При подготовке к производству плоских слитков с требованием по размеру пор не более 60 мкм температура расплава в миксере перед литьем 735/+10 °С.

2.2. Перед отдачей лигатуры в миксер, выполнить экспресс анализ «болота» затем производить загрузку легирующих. Легирующие таблетки с Mn, Si, Fe отдавать в начале плавки перед заливкой первого ковша. Последующую загрузку лигатур производить порционно перед заливкой каждого последующего ковша равномерно распределив весь требуемый объем. Магний в виде мелкой чушки присаживать в колокольчике не допуская окисления на поверхности расплава. При шихтовке Тобр. слитками магний притапливать под зеркало расплава до растворения для избежания окисления на поверхности.

2.3. МГД-перемешивание включать не менее 20 минут с реверсом по 10 минут.

2.4. При приготовлении применять установку рафинирования HD-2000. Установить следующие параметры: Скорость ротора 200-230 об/мин., расход флюса 1,5 кг/т, время цикла 20 мин. Флюс для установки HD-2000 применять гранулированный марок Promag SI, Foundry ecocer EI/Na.

2.5. Покровное флюсование производить карналлитовым флюсом из расхода 1-1,5 кг/т. Снятие шлака производить погрузчиком, при невозможности вручную.

2.6. Выпуск металла производить при температуре не ниже 730 °С в миксере для достижения температуры на холодном слитке 685-700 °С.

2.7. В процессе литья применять трехроторный дегазатор SNIF, установить параметры: Расход аргона: 4,5-5 нм<sup>3</sup>/ч на 1й, 2й, 3й ротора, расход хлора: 0,1-0,12 нм<sup>3</sup>/ч на 1й ротор, 0,05-0,07 нм<sup>3</sup>/ч на 2й ротор. Скорость вращения роторов SNIF – 450-500 об/мин.

2.8. Применять фильтр ПКФ пористостью 50 ppi. Фильтр тонкой очистки Mitsui применять согласно требованиям технической спецификации ТС на продукцию.

2.9. При подготовке расплава и во время литья производить замеры температуры.

2.10. Применять прутковый модификатор марки KBM Al-Ti5-B1. Установить расход 2-2,5 кг/т, место подачи 50% до дегазатора SNIF и 50% после дегазатора.

**Технологический регламент производства плоских слитков из сплавов серии SXXX с требованием по размеру пор не более 60 мкм**

**Таблица 1 - Параметры литья плоских слитков с требованием по размеру пор не более 60 мкм с использованием литейной оснастки «Wagstaff»**

Сечение слитков, мм	Сплав	Температура металла, °С		Скорость литья		Расход воды		Уровень металла в кристаллизаторе	
		Миксер	SNIF/Mitsui (уставка)	длина, мм	скорость, мм/мин	длина, мм	расход, м <sup>3</sup> /час	длина, мм	уровень, мм
600 x 2000*	5083	735/+10	727/730	пуск	35	пуск	32	пуск	45
				50	35	75	32	50	80
				323	60	393	200	142	88
600x1630	5083	735/+10	727/730	-	-	-	-	561	46
				пуск	35	пуск	47	пуск	45
				50	35	65	47	50	80
				350	60	371	247	136	88
				-	-	-	-	555	48

\*Отливку производить в 2 слитка при температуре на литейном столе на последнем кристаллизаторе 685 – 700 °С.

**ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ ВТР**

Номер редакции	Номер документа в СЭД	Основание для изменений	Краткое описание изменений	Разработчик редакции

## Приложение В

### Акт внедрения в учебный процесс

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

Врио ректора Университета



М.В. Румянцев

« 20 » 02 2020 г.

660041, РОССИЯ, Красноярск, проспект Свободный, 79  
телефон (391)2-44-82-13, тел./факс (391)2-44-86-26  
http://www.sfu-kras.ru, e-mail: office@sfu-kras.ru

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

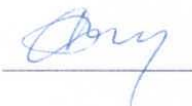
#### А К Т ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

Настоящим актом подтверждается, что патент № 2665585 RU С1 Российская Федерация, МПК G01N 9/02, G01N 1/10, G01N 33/20 «Способ определения содержания водорода в алюминиевых сплавах» и патент на полезную модель № 183559 U1 Российская Федерация, МПК G01N 1/10, G01N 33/20 «Переносное устройство для отбора пробы жидкого металла», разработанные коллективом ученых в составе: Беляев С.В., Фролов В.Ф., Деев В.Б., Баранов В.Н., Сидоров А.Ю., Партыко Е.Г., Губанова М.И. внедрены в учебный процесс и применяются при обучении магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и магистерской программы 22.04.02.07 «Теория и технология литейного производства цветных металлов и сплавов» и аспирантов по специальности 05.16.04 «Литейное производство» и используются при проведении лекционных и лабораторных занятий по дисциплинам «Технология литейного производства цветных металлов и сплавов», «Управление качеством литейной продукции», что позволяет повысить эффективность обучения и проведения научно-исследовательских курсовых и диссертационных работ.

Директор Института цветных металлов  
и материаловедения

 /В.Н. Баранов/

Заведующий кафедрой  
«Литейное производство»

 /С.В. Беляев/

Исполнитель: Лесив Е.М.  
Тел. +7 983 294 09 03  
e-mail: [elisiv@inbox.ru](mailto:elisiv@inbox.ru)