На правах рукописи

ГЕРАСИМЕНКО ЕКАТЕРИНА АРКАДЬЕВНА

Анализ структуры и разработка технологии получения литых заготовок из бронзы БрО10С2Н3 с целью изготовления из них изделий ответственного назначения.

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2014

Диссертационная работа выполнена на кафедре технологии литейных процессов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования « Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой ТЛП НИТУ «МИСиС» **Белов Владимир Дмитриевич**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, старший
научный сотрудник, МГИУ **Кац Аркадий Мордухович**

кандидат технических наук,
директор ООО НПП «Элмет» **Волков Владимир Алексеевич**

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых»**

Защита состоится «26» июня 2014 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.132.02 при ФГАОУ ВПО «Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, ауд. А-305.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба направить по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Ученый Совет.

Копии отзывов можно прислать на e-mail: vdbelov@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС»

Автореферат разослан «26» мая 2014 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д.212.132.02
Доцент, к.т.н А. В. Колтыгин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Заготовки из оловянистых бронз нашли широкое применение в современном авиастроении благодаря уникальному сочетанию физических, механических и эксплуатационных свойств. В связи с этим получение слитков со стабильно высоким уровнем качества из таких сплавов как бронза БрО10С2Н3 с набором свойств, требуемых нормативной документацией, для отливок ответственного назначения является актуальной задачей.

В настоящее время в изделиях системы торможения самолетов применяются такие детали, как башмак, втулка и другие, изготавливаемые из бронзовых заготовок, получаемых наполнительным литьем в стальную изложницу. Однако, из–за большого интервала кристаллизации сплава БрО10С2Н3, в литых заготовках частым является дефект в виде пористости. Кроме этого, нестабильна структура сплава в части содержания в ней требуемого количества эвтектоидной составляющей, конкретно прописанного в технологической документации.

Данная ситуация свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования технологического процесса изготовления литых заготовок из оловянистой бронзы БрО10С2Н3.

Формирование структуры сплава в слитках зависит от многих факторов, основными из которых являются: температура формы и заливаемого металла, скорость кристаллизации сплава и затвердевания слитка, а также время заполнения расплавом полости формы. Влияние каждого из отмеченных факторов на структуру оловянистых бронз в слитках в целом хорошо изучено. Однако, информация о возможности получения из широкоинтервальной оловянистой бронзы БрО10С2Н3 слитков без усадочной и газовой пористости с высоким выходом годного и со стабильным содержанием эвтектоида в структуре сплава, в литературе отсутствует. В связи с этим целесообразно проанализировать влияние дополнительных факторов, кроме отмеченных выше, на их качество. Основываясь на анализе литературных данных, было установлено, что на плотность слитка существенное влияние может оказывать ультразвуковая обработка расплава в процессе его кристаллизации. При этом недостаточно сведений о влиянии этой обработки на структуру и фазовый состав сплавов, в частности бронзы БрО10С2Н3.

Цель работы

1. Исследование структуры бронзы БрО10С2Н3 в слитках, затвердевающих в поле ультразвуковых волн при различных скоростях охлаждения.
2. Разработка технологии плавки и литья бронзы БрО10С2Н3, позволяющей получать слитки стабильно высокого качества отвечающих требованиям ОСТ 1 90054-72 и

ТУ1-92-145-89 (далее ТД) с выходом годных[1)] изделий не менее 70 %.

Для достижения цели работы потребовалось решить следующие задачи:

1. Определить температуры фазовых превращений бронзы БрО10С2Н3 (ликвидус, солидус).
2. Выявить влияние ультразвуковой обработки расплава на структуру сплава и пористость в литых заготовках.
3. Установить связь скорости охлаждения расплава со способом охлаждения литейной формы, со структурой бронзы БрО10С2Н3 и качеством слитка.
4. Определить оптимальные условия для изготовления литых заготовок из бронзы БрО10С2Н3, позволяющих получать их с высоким выходом годных заготовок (не менее 70 %) и качеством не ниже требований ТД.

<u>Научная новизна</u>

1. Подтверждена связь скорости затвердевания слитка из бронзы БрО10С2Н3 с количеством эвтектоидной составляющей в микроструктуре бронзы, и установлено положительное влияние ультразвуковой обработки при затвердевании расплава на количество данной составляющей. В слитке Ø90хØ120х160 мм при затвердевании без ультразвуковой обработки объемная доля эвтектоида составила около 3,6 %, а при затвердевании в поле ультразвуковых волн около 4,8 %.

2. Экспериментально доказано, что при кристаллизации сплава БрО10С2Н3 в стальной изложнице (толщина стенки 10 мм, высота 160 мм, диаметр 90 – 120 мм) в поле ультразвуковых волн градиент температуры по сечению слитка уменьшается более чем в два раза. Это приводит к увеличению в структуре сплава зоны равноосных кристаллов.

3. Установлено, что при кристаллизации сплава БрО10С2Н3 в поле ультразвуковых волн в литейной форме, состоящей из стальной рубашки и теплопроводного наполнителя (графит) реализуется процесс направленной кристаллизации. Что позволяет получать гарантировано плотные слитки. При этом выход годных заготовок увеличивается до 70 %.

4. Впервые проведены исследования структуры в оловянистой бронзе БрО10С2Н3 при наполнительном литье с различными условиями затвердевания (донное и объемное водяное охлаждение: в поле ультразвуковых волн и при литье в комбинированную форму).

5. Уточнен фазовый состав оловянистой бронзы БрО10С2Н3 с добавлением 3 % Ni при литье в комбинированную литейную форму.

[1)] Выход годных изделий – это количество годных колец, выточенных из слитка БрО10С2Н3 Ø90хØ120х160 мм, размером Ø68хØ25х5 мм. (10 штук – 100 %).

Практическая значимость

1. Предложен способ заливки в комбинированную литейную форму в поле ультразвуковых волн бронзы БрО10С2Н3, обеспечивающий требуемое содержание эвтектоида наряду с высокой плотностью слитка.
2. Повышена технологичность и стабильность процесса изготовления слитков из бронзы БрО10С2Н3 с применением ультразвуковой обработки за счет изменения способа создания поля ультразвуковых волн в процессе кристаллизации сплава и отказа от использования воды для охлаждения изложницы в процессе затвердевания слитка.
3. Увеличен более чем на 30 % выход годных заготовок при литье слитков Ø90хØ120х160 мм из бронзы БрО10С2Н3 по новой технологии.

Апробация работы

Основные материалы диссертационной работы были доложены и обсуждены: на международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», НИТУ «МИСиС», Москва, 2013; на конференции «Литые материалы и ресурсосберегающие технологии», ВлГУ, Владимир, 2013; на международном научно – техническом симпозиуме, СамГТУ, г. Самара, 2008.

Результаты диссертационной работы отражены в 6 публикациях в виде статей и тезисов докладов конференций, в том числе 3 статьи из списка рекомендуемых ВАК изданий.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на страницах, содержит рисунков, таблицы, состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы из наименований.

Достоверность научных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием аттестованных измерительных установок (спектрометр Thermo Fisher ARL 4460, сканирующий микроскоп Tescan Vega 3, оптический микроскоп NEOPHOT-32). Текст диссертации и автореферат проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (http://antiplagiat.ru)

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, сформированы цели и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены особенности кристаллизации оловянистой бронзы на основе анализа диаграмм состояния Cu-Sn, Cu-Ni, Cu-Pb. Изучено влияние различных

элементов на свойства сплава. Особое внимание уделялось процессу затвердевания отливок при различных скоростях охлаждения и действиям внешних факторов на качество заготовок.

Установлено, что на наличие пористости и определенного количества эвтектоидной составляющей в бронзах сильное влияние оказывает скорость охлаждения. Также в литературе имеется информация о положительном действии ультразвука на структуру сплава и его дегазацию.

Представлен обзор литературных данных о методиках получения заготовок из оловянистых бронз.

Во второй главе даны характеристики основных методов исследования.

Основным объектом исследования являлась оловянистая бронза БрО10С2Н3 по ОСТ 1 90054-72, имеющая следующий химический состав: 9-11 % Sn; 2,00-3,25 % Pb; 3-4 % Ni; остальное Cu. По примесям допускается не более: 0,3 % Sb; 0,3 % Fe; 0,02 % Al; 0,02 % Si; 0,02 % Bi; 0,1 % P; 0,5 % Zn; сумма примесей 1,2 %.

Оловянистую бронзу плавили в индукционной печи ИСТ 0,06, в графито-шамотном тигле емкостью 50 марок. Масса каждой плавки составляла не менее 25 кг. В качестве шихты использовался возврат от предыдущих плавок с дошихтовкой оловом для обеспечения требуемого химического состава сплава по ОСТ 1 90054-72. Температуру расплава измеряли хромель-алюмелевой термопарой.

В период завалки в тигель укладывался возврат в виде слитков совместно с графитовым боем фракцией 10 – 30 мм. В верхнюю часть тигля поверх шихты также загружался графитовый бой для создания восстановительной атмосферы.

После расплавления загруженной шихты осуществлялся ввод олова и дальнейший разогрев расплава до температуры 1140 – 1160 °С. Далее, при работающей на нагрев печи (для поддержания указанной температуры), осуществлялась продувка расплава аргоном марки «Высший сорт» по ГОСТ 10157-79 в течение 3 –5 минут (в зависимости от массы расплава).

По окончанию продувки нагрузка с печи сбрасывалась, и расплав выдерживался в тигле в течение 3 – 5 минут. Параллельно с этим осуществлялся разогрев заливочной воронки до температуры 750 – 800 °С. После выдержки с поверхности расплава удалялся шлак и кусковой графит, корректировалась температура расплава (1090 – 1105 °С) и производилась заливка в изложницу.

Для получения ультразвуковых колебаний использовался ультразвуковой генератор модели УЗГ-Д-01. Ультразвук наводился на внешнюю поверхность стальной изложницы. При заливке метала в изложницу резонансная частота составляла 20 – 23 кГц, сила тока 1,3 – 1,5 А.

Химический анализ сплава проводили на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 4460.

Макроструктуру исследовали после травления продольного разреза слитка персульфатом аммония в водном растворе при температуре 70 – 80 °С.

Микроструктуру заготовки изучали на образцах, вырезанных из слитка (рис. 1). Анализ микроструктуры и пористости на шлифах проводился с использованием микроскопа «NEOPHOT-32». Травление поверхности образцов на микроструктуру проводилось $FeCl_3$ в 10 - % растворе HCl. Дополнительно количественная оценка пористости проводилась с помощью рентгеновского аппарата РАП 220-5 на режимах U=170кВ, I=2,5мА, t=900с Фотографирование микроструктуры производилось с помощью цифровой камеры окуляра на персональный компьютер, где с помощью компьютерной программы ImageExpert Pro 3 производился обсчет объемной доли эвтектоида.

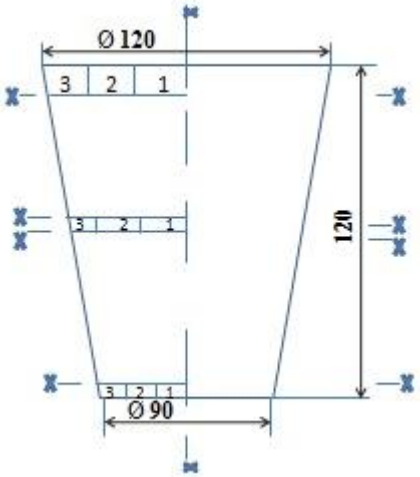


Рисунок 1 - Схема вырезки образцов из слитка размером Ø90х Ø120х160 мм из бронзы БрО10С2Н3

Структурные исследования фаз и поверхность разрушения при разрыве образцов проводили на сканирующем микроскопе Tescan Vega 3 с системой микроанализа Oxford Instruments.

<u>В третьей главе</u> представлены результаты работы по исследованию влияния условий кристаллизации слитков из оловянистых бронз с целью изготовления из них деталей ответственного назначения.

Данная работа была направлена на получение такого способа литья оловянистой бронзы, при котором она соответствовала бы определенному набору требований к литым заготовкам, используемым при диффузионной сварке. Уникальность деталей, изготовляемых из бронзы БрО10С2Н3, состоит в том, что их используют как биметаллические детали. То есть происходит диффузионная сварка металла А с металлом Б: металл А – сталь, металл Б – бронза БрО10С2Н3. Из–за области их применения (авиакосмическая), к ним предъявляются жесткие требования по наличию пористости, количеству и расположению эвтектоидной составляющей. Допустимым по результатам рентгеноконтроля считается, не более 10 пор на 1 $см^2$, из них лишь 2 размером до 0,2 мм, остальные до 0,1 мм. При этом содержание эвтектоидной

составляющей, после обсчета в программе ImageExpert Pro 3 эталонных фотографий составляет от 4,5 до 9,0 %.

После анализа действующей технологии получения заготовок из многокомпонентной оловянистой бронзы БрО10С2Н3 был сделан вывод, о том, что их качество зависит от большого количества технологических факторов.

В связи с этим на первом этапе данной диссертационной работы процессы заливки и затвердевания слитка в изложницу были промоделированы в компьютерной программе ProCast. При этом было проверено влияние различных факторов (температур заливки и боковой поверхности изложницы, влияние тепловой насадки и скорости заливки) на уменьшение пористости в объеме заготовки. Моделирование осуществлялось для слитка размером Ø90xØ120x160 мм.

В результате моделирования и проведенных лабораторных экспериментов было установлено, что:

- При затвердевании слитка с различными температурами боковых стенок изложницы наблюдается наиболее плотное формирование слитка при условии минимального бокового теплоотвода от поверхности слитка (температура стенки 800 – 900 °С), либо при условии пересечения фронтов кристаллизации идущих от боковых поверхностей и от донной части со стороны водоохлаждаемого поддона (температура стенки 200 °С) (рис. 2).

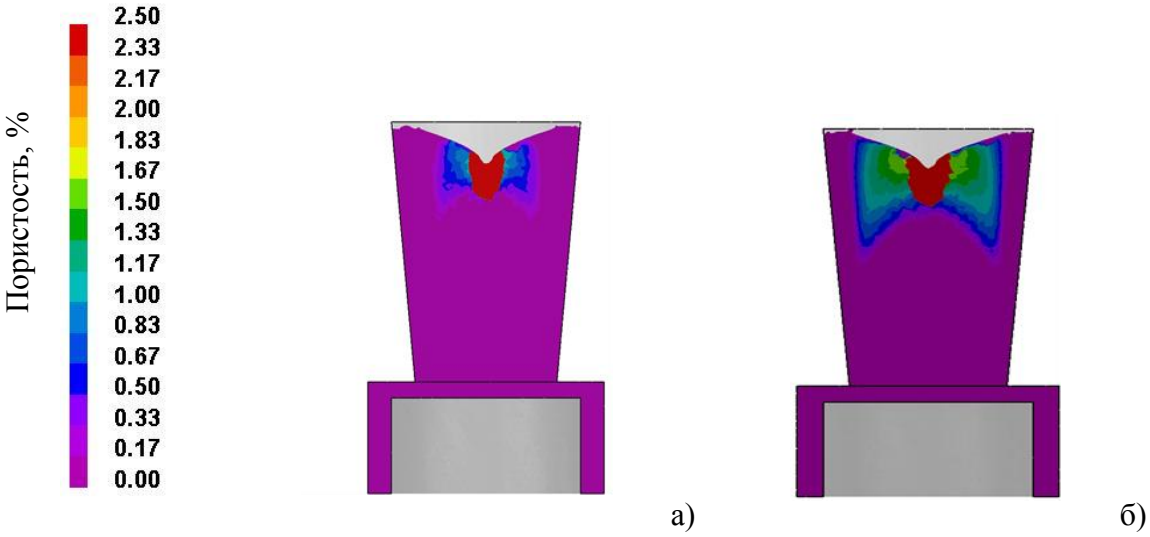


Рисунок 2 - Результаты моделирования затвердевания слитков с размером Ø90x Ø120x160 мм из бронзы БрО10С2Н3:
а) – температура боковой стенки 200 ºС; б) - 400 ºС

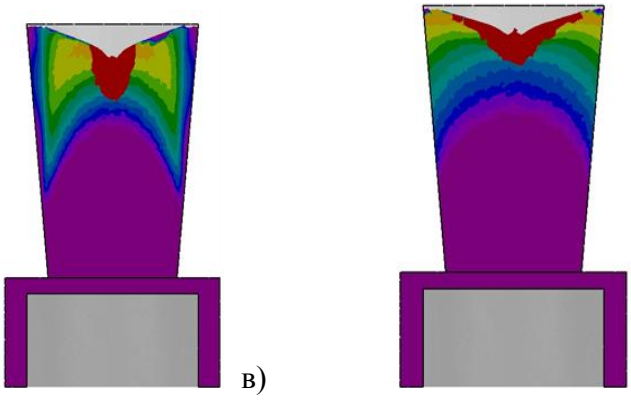


Рисунок 2 (продолжение) - Результаты моделирования затвердевания слитков с размером Ø90х Ø120х160 мм из бронзы БрО10С2Н3:
в) – температура боковой поверхности изложницы 600 ºС; г) – 800 ºС.

- При использовании надставки из материала с малой теплопроводностью (ХТС смесь) глубина усадочной раковины уменьшается, и слиток получается более плотным (рис. 3). Для слитка высотой 160 мм при литье с насадкой годная часть увеличивается на 10 % и составляет 110 мм.

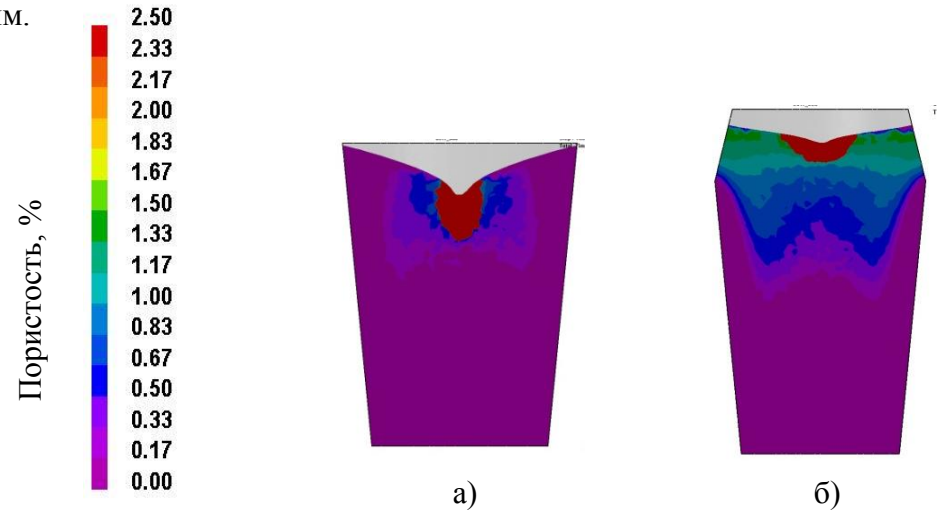


Рисунок 3 - Результаты моделирования затвердевания слитка:
а) без прибыльной надставки; б) с прибыльной надставкой.

- Изменение длительности заливки (с 5 до 60 с) не оказывает существенного влияния на величину усадочной раковины и пористость в слитках. Так, при температуре заливки 1100 °С и формы 200 °С были получены результаты, приведенные на рис. 4.

Анализируя результаты моделирования процесса затвердевания слитка из бронзы БрО10С2Н3 в стальной изложнице с донным водяным охлаждением, пришли к выводу, что наилучшие результаты по его плотности достигаются, когда температура стенки изложницы в процессе заливки составляет около 200 °С и используется надставка. При этом не оценивалась взаимосвязь плотности слитка с содержанием эвтектоида в структуре сплава. Из анализа литературных данных, установлено, что с увеличением скорости охлаждения количество эвтектоида в оловянных бронзах увеличивается.

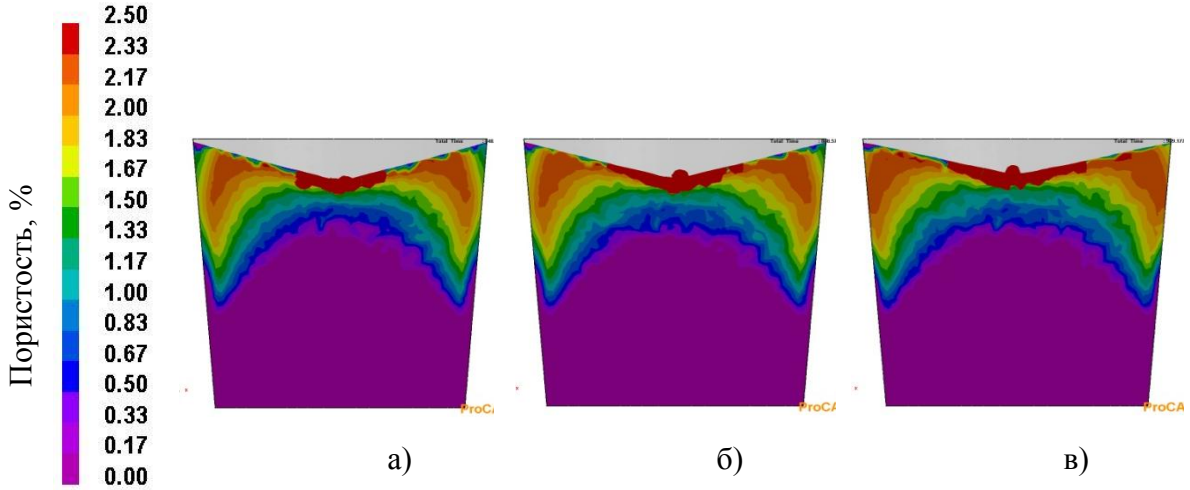


Рисунок 4 - Моделирование затвердевания при различной длительности заливки: а) 5 с; б) 20 с; в) 60 с.

Основываясь на результатах моделирования процессов кристаллизации бронзы БрО10С2Н3 и затвердевания слитка, а также на анализе литературных данных, была разработана технология приготовления расплава в индукционной тигельной печи и литья в металлическую изложницу.

Этапы технологического процесса приготовления расплава представлены на рис. 5.

При разработке технологии литья бронзы в изложницу предварительно было исследовано два способа, так как очень сложно добиться в готовом слитке одновременно практически полного отсутствия пористости, определенного количества эвтектоида и увеличение выхода годного.

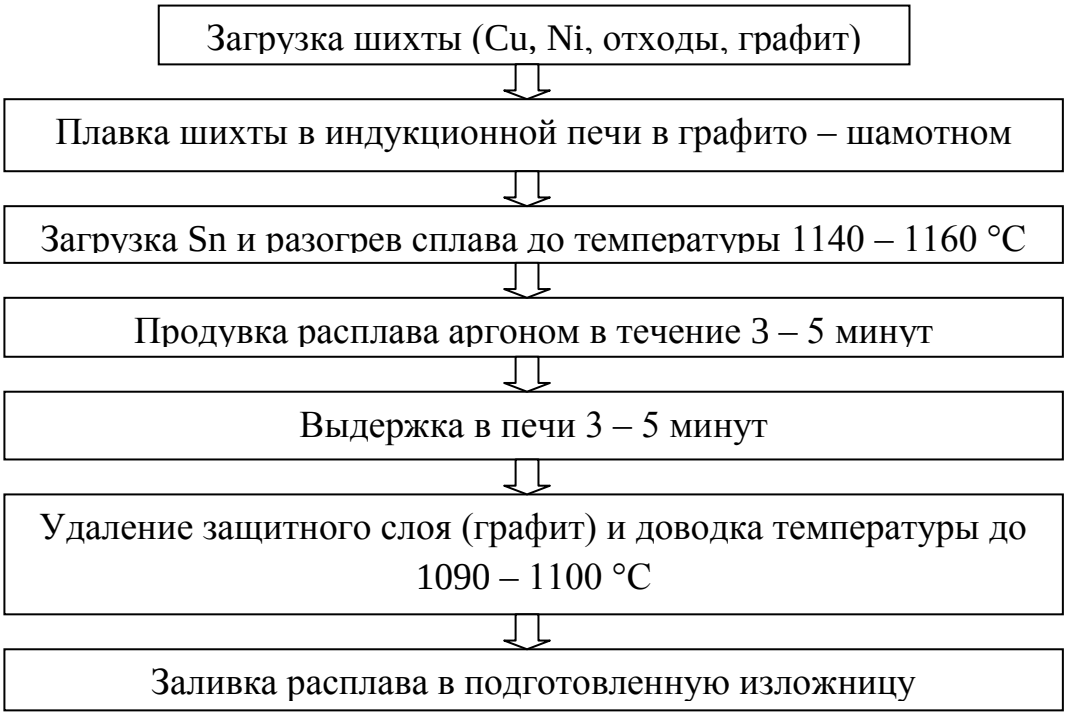


Рисунок 5 - Этапы технологического процесса приготовления расплава из бронзы БрО10С2Н3.

При анализе технологии с донным водяным охлаждением изложницы установлено (рис. 6), что в процессе затвердевания с донной части слитка теплоотвод от жидкого расплава постоянно уменьшается в силу нарастания твердой фазы и увеличения расстояния от фронта кристаллизации к донной теплопроводящей поверхности. Получение качественных заготовок имеет периодический характер и зависит от многих факторов (температуры и напора воды в системе охлаждения изложницы, скорости литья и т. д.).

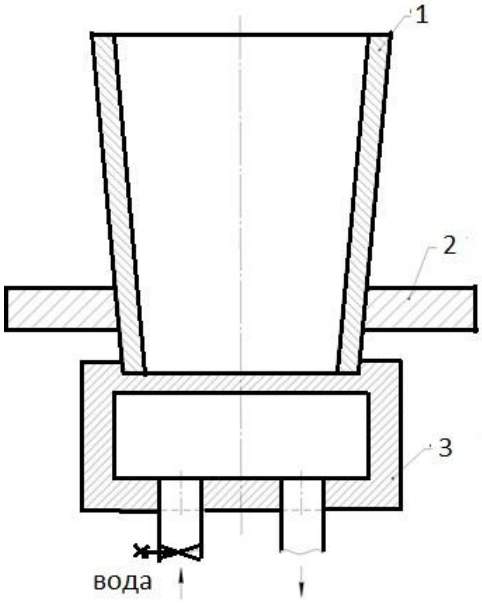


Рисунок 6 - Схема литья слитков методом донного охлаждения:
1-стальная изложница, 2-транспортировочная «юбка» изложницы, 3-бронзовый водоохлаждаемый поддон

Увеличение интенсивности теплоотвода от изложницы поднимающимся потоком воды (разновидность метода Лаврова, с некоторыми дополнениями) (рис. 7).

Рисунок 7 - Схема литья слитков методом направленного затвердевания с объемным охлаждением изложницы:
1- надставка из ХТС смеси;
2- стальная изложница;
3- емкость с охлаждающей жидкостью; 4- стальной стол

При температуре заливаемого металла 1090 – 1100 °С, температуре воды на входе 25 °С, на выходе - около 40 °С и при синхронном подъеме уровня металла и воды установлено следующее:

1. Глубина усадочной раковины составляет около 65 мм, при высоте слитка 160 мм. Зона плотного слитка около 70 мм, что дает возможность получения большего количества заготовок из слитка.

2. Макроструктура (рис. 8) представляет собой две зоны: зона столбчатых кристаллов – 10 мм, в верхней части кристаллы более крупные - до 20 мм и зона равноосных кристаллов со средним размером около 2,2 мм.

3. Количество эвтектоида в структуре бронзы БрО10С2Н3 в среднем около 3,0 – 3,5 %, что меньше требований ТД.

Рисунок 8 - Макроструктура бронзы БрО10С2Н3, полученная при объемно-направленной кристаллизации. х26

Данным методами литья не удалось добиться стабильного выполнения всех требований, предъявляемых технической документацией, к качеству слитка из бронзы БрО10С2Н3. Более плотные слитки получаются при медленном охлаждении, однако количество эвтектоида при этом снижается. Результаты, проведенных экспериментов хорошо коррелируют с результатами моделирования процесса литья бронзы БрО10С2Н3 в изложницу с донным охлаждением и затвердевания слитка, что говорит о правильности определенных и выбранных в расчетах данных, вводимых в базу данных программы ProCast, в частности, температур ликвидуса (1023 °С) и солидуса (968 °С).

В четвертой главе. Анализ литературных данных показал, что благоприятное воздействие на структуру и свойства сплава оказывает ультразвуковая обработка. Так, вводимые в расплав ультразвуковые колебания способствуют дегазации, дополнительному перемешиванию, препятствуют концентрации неметаллических включений на границах зерен. Исходя из этого, исследовали метод литья бронзовых заготовок в изложницу, находящуюся в поле ультразвуковых волн. При проведении экспериментов для определения влияния ультразвука на процесс затвердевания было исследовано распределение тепловых полей в слитке и литейной форме. Для этого в литейную форму было вмонтировано 10 термопар (рис. 9).

По результатам показаний термопар установлено, что градиент температур как по высоте, так и по сечению слитка, уменьшается и быстрее выравнивается, что приводит к более интенсивному питанию кристаллизующегося расплава и формированию более плотных слитков. Это вероятно связано с тем, что за счет акустических волн, создаваемых ультразвуком, происходит перемешивание расплава в процессе его охлаждения и кристаллизации (рис.10).

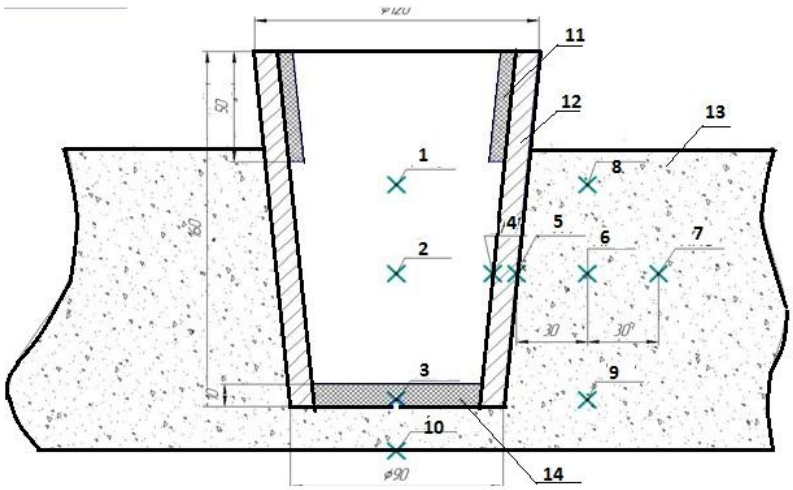


Рисунок 9 - Расположение термопар в литейной форме.
1-10 – термопары,
11 – теплоизоляционная вставка,
12 – стальная изложница,
13 – графитовый наполнитель,
14 – графитовая вставка.

В связи со сложностью ввода волновода излучателя в расплав и из-за жестких требований по химическому составу к конечной заготовке ультразвук наводился на изложницу (резонансная частота).

С целью проверки целесообразности интенсивного охлаждения слитков в процессе затвердевания была проведена серия заливок с охлаждением изложницы на воздухе и применением УЗО.

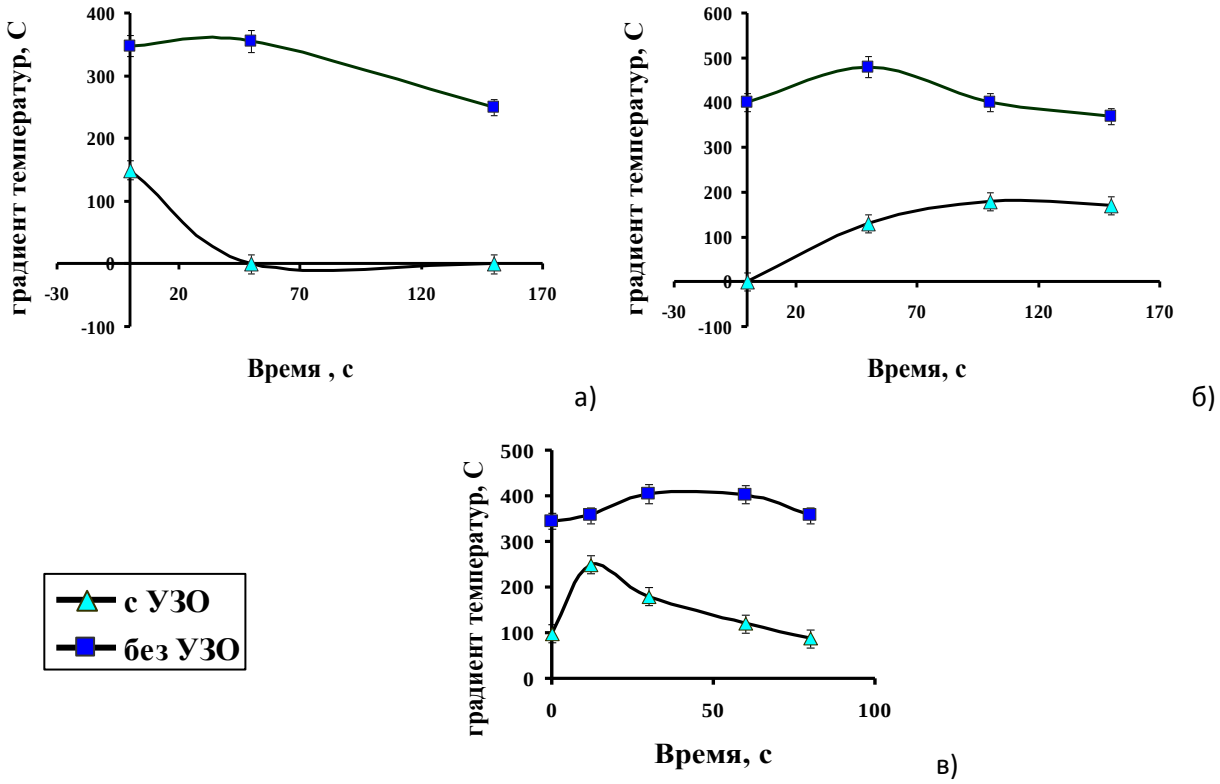


Рисунок 10 - Градиент температур:
а) - между термопарами 2-1; б) - между термопарами 2-3; в) - между термопарами 4-2.

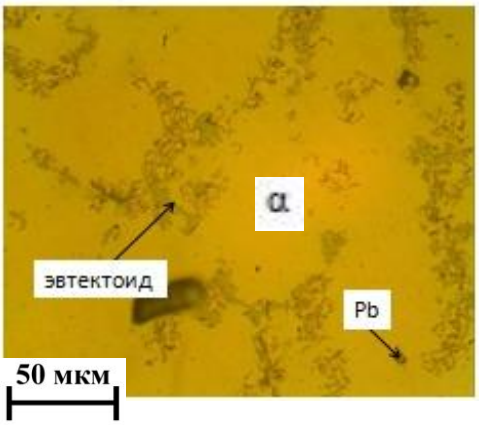
При этом изложница не подвергалась предварительному нагреву перед заливкой, но находилась в поле ультразвуковых волн в процессе затвердевания слитка. После затвердевания

слитка обработка ультразвуком прекращалась. Продольный разрез слитка, полученного в условиях воздушного охлаждения изложницы с применением УЗО, представлен на рисунке 11.

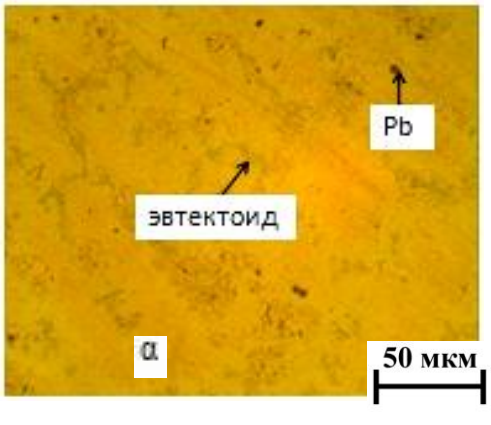
Полученная макроструктура имеет две четко выраженные зоны: зона столбчатых кристаллов (около 20 мм) и зона равноосных кристаллов (размер кристаллов около 4 мм). Полученные слитки имели высокую плотность.

Рисунок 11 - Макроструктура слитка, полученного литьем бронзы БрО10С2Н3 в металлическую изложницу в поле ультразвуковых волн при охлаждении ее на воздухе.

Анализ микроструктуры с помощью программы ImageExpert Pro 3 выявил существенный разброс по количеству объемной доли эвтектоида по высоте слитка: от 3 % в нижней части до 7 % в верхней (рис. 12). Это вероятно связано с неравномерным охлаждением слитка в изложнице из – за повышения интенсивности ее теплоотвода за счет охлаждения излучением.



а)



б)

Рисунок 12 - Микроструктура слитка из БрО10С2Н3 при воздушном охлаждении изложницы в поле ультразвуковых волн:
а) – нижняя часть слитка, б) – верхняя часть слитка.

В связи тем, что количество эвтектоида в структуре бронзы БрО10С2Н3 имеет большой разброс по высоте слитка, и связано это с неравномерным отводом тепла от стенок изложницы, необходимо добиться минимизации температурного градиента по сечению слитка. Для этого

были проведены плавки с объемно — водяным охлаждением изложницы в поле ультразвуковых волн по методике, описанной во 2 главе. Продольный разрез слитка, полученного в условиях объемного охлаждения с применением УЗО, представлен на рисунке 13.

Рисунок 13 - Макроструктура слитка, полученного литьем бронзы БрО10С2Н3 в металлическую изложницу с объемным водяным охлаждением и применением УЗО в процессе затвердевания. х30

Из рисунка видно, что зона столбчатых кристаллов слаборазвита, состоит из мелких кристаллов, и высота их составляет около 5 - 8 мм. Размер равноосных кристаллов составляет около 1 мм. Глубина усадочной раковины образцов, полученных с использованием УЗО, составляет около 40 мм. Объемная доля эвтектоида, применительно к слиткам, полученным данным методом, составляет около 8,0 – 8,5 % (рис. 14), что соответствует эталонным требованиям ТД. Однако при анализе образцов было выявлено большое количество пор усадочного происхождения, имеющих грубую форму и находящихся в основном в центральной части образца.

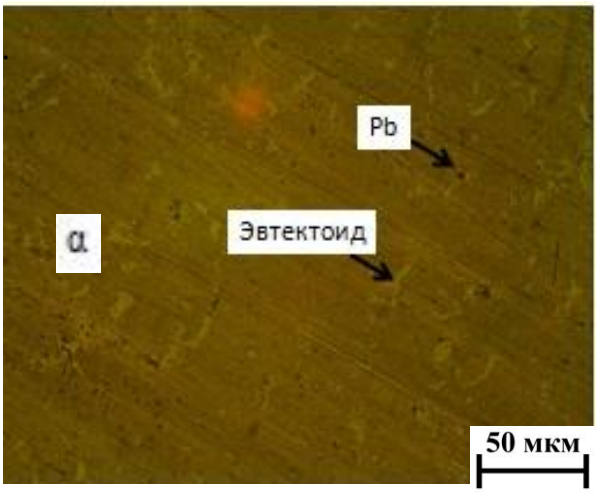


Рисунок 14 - Микроструктура бронзы БрО10С2Н3 в слитке, полученном литьем в металлическую изложницу с объемным водяным охлаждением и применением УЗО в процессе затвердевания.

При сравнении с литьем с воздушным охлаждением изложницы можно отметить, что эвтектоид в структуре бронзы БрО10С2Н3 по высоте слитка распределен практически равномерно. Однако в слитках, полученных литьем в изложницы с объемно — водяным охлаждением, имеется пористость, превышающая требования ТД. Таким образом, можно

заключить, что способ получения слитков из бронзы БрО10С2Н3 литьем в изложницу с объемно – водяным охлаждением в поле ультразвуковых волн не позволяет изготавливать слитки в соответствии с требованиями ТД только в части пористости. Устранить вероятность образования усадочной пористости в слитках из широкоинтервальной бронзы БрО10С2Н3 возможно только организацией направленного процесса кристаллизации сплава при их затвердевании. Для проверки направленности затвердевания слитка в программе ProCast был проведен анализ распределения тепла в графитовом наполнителе (рис. 15). В связи с результатами моделирования процесса затвердевания слитков была разработана конструкция литейной формы состоящей из двух частей: стальной рубашки и теплопроводного наполнителя — графита.

В связи с тем, что теплопроводность наполнителя зависит от его плотности, была проведена серия экспериментов для оценки влияния степени уплотнения графитового наполнителя на интенсивность теплоотвода от стальной рубашки. Интенсивность теплоотвода оценивалась качественно через величину зоны столбчатых кристаллов в слитке: чем шире зона столбчатых кристаллов, тем интенсивнее теплоотвод. В результате проведенных экспериментов установлено, что наиболее мелкие столбчатые кристаллы получаются при минимальной плотности уплотнителя, что соответствует насыпной плотности графита и малой интенсивности теплоотвода от поверхности стальной рубашки (рис. 16).

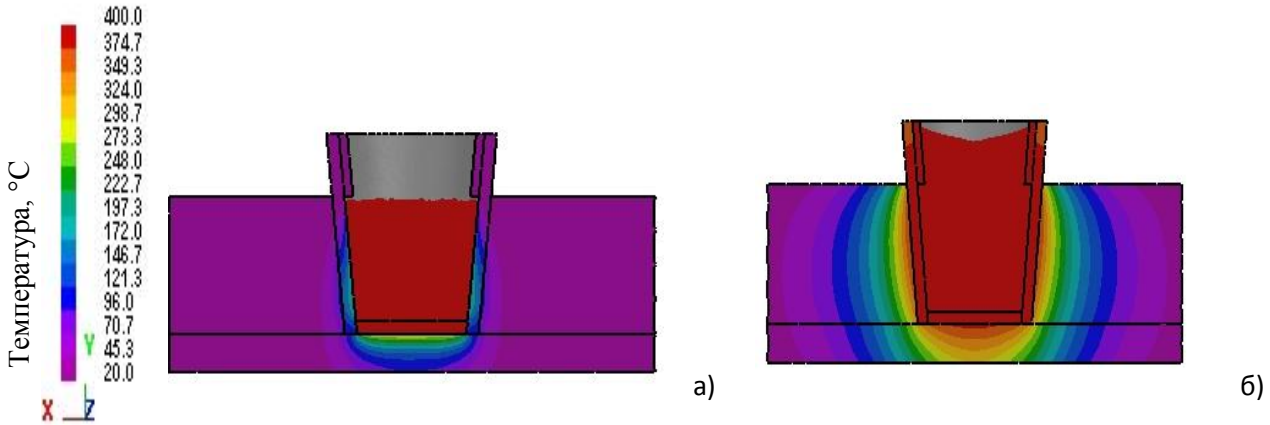


Рисунок 15 – Распределение температуры в графитовом наполнителе по времени в слитке из бронзы БрО10С2Н3:
а) – 10 с, б) – 400 с.

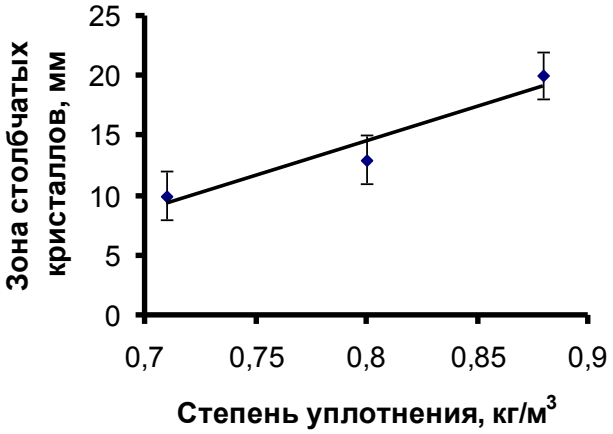


Рисунок 16 - Зависимость размера зоны столбчатых кристаллов от степени уплотнения графитового наполнителя.

Анализ качества слитков из бронзы БрО10С2Н3, изготовленных с применением ультразвука и новой конструкции литейной формы показал следующее:

- Макроструктура бронзы БрО10С2Н3 в слитке Ø90хØ120х160 мм состоит из двух зон: зоны столбчатых кристаллов и зоны равноосных кристаллов (рис. 17). Зона столбчатых кристаллов составляет около 10 - 12 мм и не имеет ярко выраженного характера. Центральная часть слитка состоит из равноосных кристаллов размером менее 1 мм.

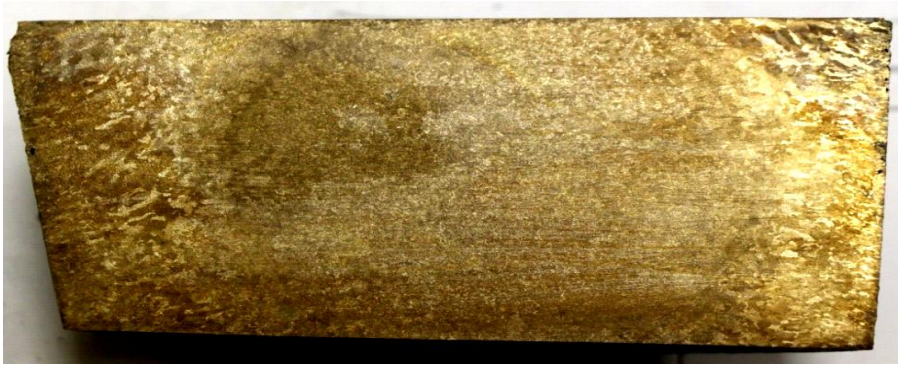


Рисунок 17 - Макроструктура сплава БрО10С2Н3 в слитке, полученном в условиях охлаждения в литейной форме с графитовым наполнителем в поле ультразвуковых волн.

- В результате рентгенконтроля пластин, вырезанных из слитка, установлено:
  - ✓ В трех пластинах обнаружены поры размером более 0,2 мм, в количестве более одного.
  - ✓ В пяти пластинах обнаружены неметаллические включения.

Для оценки пористости на электронном сканирующем микроскопе были изучены образцы при больших увеличениях (х2000). В результате были обнаружены газовые поры, размером от 3 — 5 мкм (рис. 18), что вероятно связано с процессами кавитации, которые протекают в расплаве в ходе ультразвуковой обработки. (По требованиям ТД допускается не более 10 пор на 1 см^2, из них лишь 2 размером до 0,2 мм, остальные до 0,1 мм.)

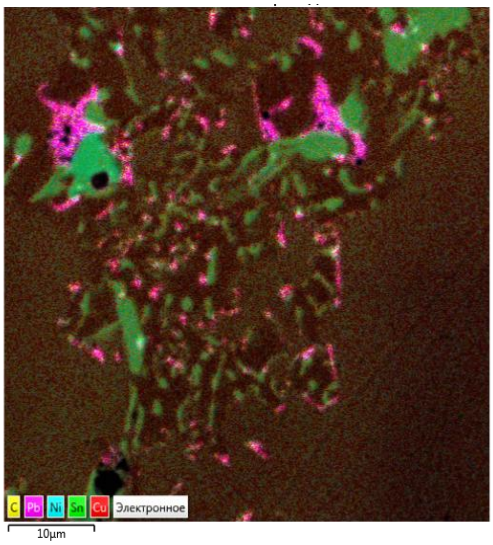
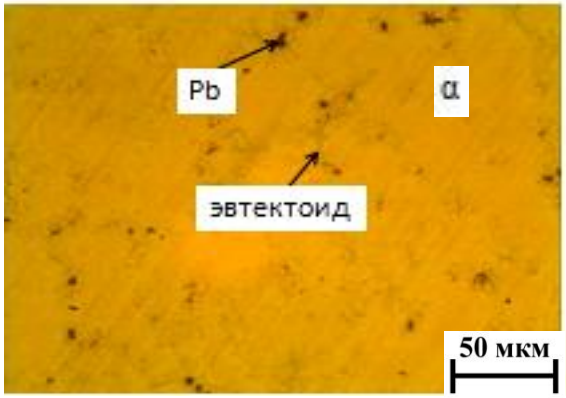
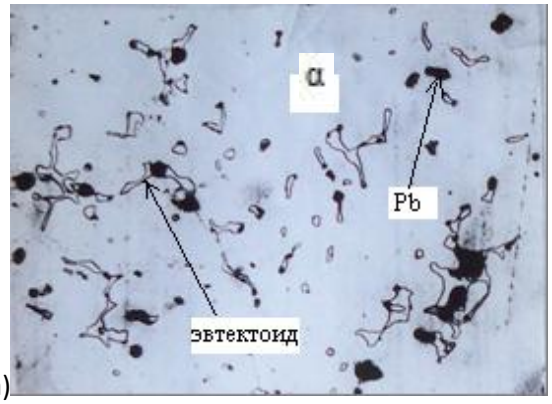


Рисунок 18 – Многослойная карта. Расположение и размер пор в слитке из бронзы БрО10С2Н3 при его изготовлении литьем в литейную форму с графитовым наполнителем в поле ультразвуковых волн.

- Объемная доля эвтектоида в структуре бронзы БрО10С2Н3 составляет около 4,8 – 5,0 %. Количество эвтектоида определялось с помощью программы ImageExpert Pro 3 на шлифах после травления реактивами: $FeCl_3$ в 10 % растворе HCl (рис. 19, а). Требованиям ТД по количеству (от 4,5 до 9,5 %) и распределению (рис. 19, б) эвтектоида полученные результаты полностью соответствуют.



а)



б)

Рисунок 19 - Микроструктура бронзы БрО10С2Н3. а) полученная литьем в комбинированную форму; б) эталон (х200)

- Выход годного составляет:
  - ✓ по отсутствию пористости в слитке – 70 %;
  - ✓ по количеству эвтектоида в структуре сплава - 100 %;
  - ✓ по отсутствию неметаллических включений в слитке – 50 %.

На основании вышеизложенного можно заключить, что разработанная технология плавки и литья слитков из бронзы БрО10С2Н3 с применением ультразвуковой обработки расплава позволяет получать литые заготовки в соответствии с требованиями, предъявляемыми к ним технической документацией. При этом для повышения выхода годного необходимо в

технологию изготовления слитков из бронзы БрО10С2Н3 обязательно ввести операцию фильтрования расплава на этапе заливки литейной формы.

В разделе «Введение» данной работы отмечалось, что из бронзы БрО10С2Н3 изготавливаются литые детали ответственного назначения, применяющиеся, в частности, в конструкциях системы торможения самолетов. В связи с этим, а также принимая во внимание, что разработанная технология литья слитков из сплава на основе меди, легированного оловом, свинцом и никелем, существенно влияет на структуру сплава, был проведен микрорентгеноспектральный фазовый анализ его структуры (на сканирующем микроскопе Tescan Vega 3), результаты которого представлены на рис. 20 и таблице 1.

.

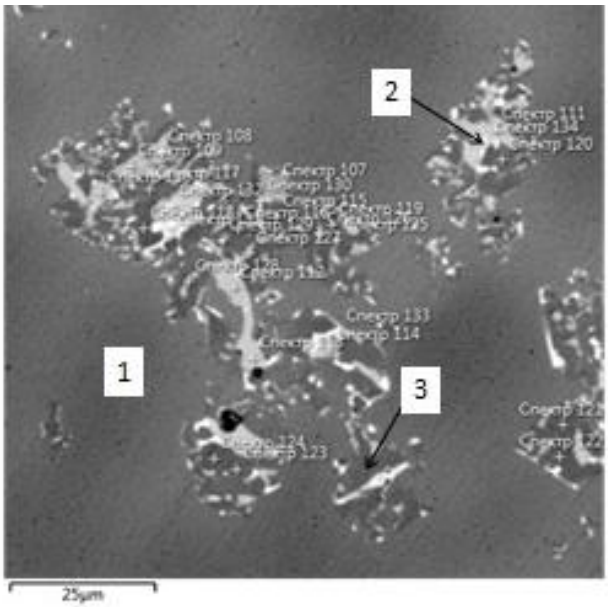


Рисунок 20 - Электронное изображение сплава БрО10С2Н3, увеличение х2000.

Таблица 1

Распределение элементов в фазах в бронзе БрО10С2Н3

№ по рисунку 20	Название фазы	Ni, %	Cu, %	Sn, %
1	Матрица α-фаза	4	90	6
	Границы зерна:			
2	эвтектоид	10	53	37
3	«Темная» фаза, около эвтектоида	0,8	89	8,5

Из приведенных данных видно, что структура сплава состоит из нескольких фаз: α-твердого раствора (90Cu – 4Ni – 6Sn), эвтектоида (53Cu – 10Ni – 37Sn), промежуточной фазы (89Cu – 0,8Ni – 8,5Sn) и свинца.

Никель растворен во всех медьсодержащих фазах. Форма выделения этих фаз в структуре сплава изменяется в сторону измельчения в случае его кристаллизации в поле

ультразвуковых волн. Распределены эти фазы практически равномерно в объеме слитка по границам зерен.

Олово в структуре находится как в растворенном виде (α фаза), так и в составе интерметаллидных фаз, содержащих медь и никель.

Свинец, как следует из диаграммы состояния системы Cu-Pb, практически не растворяется в меди, однако из-за высоких скоростей охлаждения (около 20 °С/с) и наведения ультразвуковых волн, он находится в структуре сплава не только в сферическом виде по границам зерен, но и занимает междендритное пространство, что выражается в формировании его в неправильной форме и мелких размеров (рис. 18, 21). Распределение свинца в объеме слитка практически равномерное.

Из проведенного анализа распределения легирующих элементов в структуре бронзы БрО10С2Н3 в слитках Ø90хØ120х160 мм, изготовленных методом наполнительного литья в двухслойные изложницы (стальная рубашка – графит) и затвердевающих в поле ультразвуковых волн, можно заключить:

- Олово, свинец и никель в структуре сплава распределены равномерно;

  Форма, размеры и количество образующихся фаз гарантируют высокий уровень эксплуатационных свойств сплава.

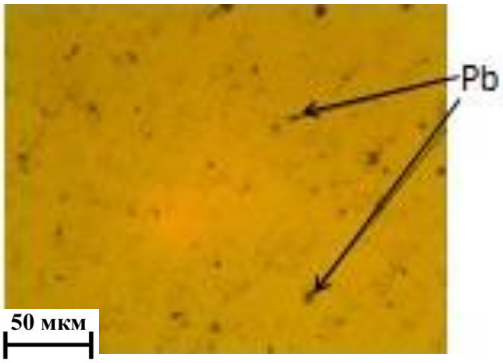


Рисунок 21 - Вид свинца в бронзе БрО10С2Н3, полученной при литье в металлическую форму с графитовым наполнителем, в поле ультразвуковых волн.

<u>Пятая глава</u> Опытно-промышленное опробование технологии изготовления слитков из бронзы БрО10С2Н3, разработанной на основании результатов, полученных в данной работе, проводили на участке индукционной плавки цеха 42 ОАО «АК «Рубин». В рамках опытно-промышленного опробования изготавливались слитки Ø90хØ120х160 мм. Сплав приготавливали в индукционной печи ИСТ 0,16. В качестве шихты использовали возврат собственного производства, с дошихтовкой чистыми металлами (Sn, Pb). В период завалки в тигель укладывался возврат в виде слитков совместно с графитовым боем фракцией 10 – 30 мм. В верхнюю часть тигля поверх шихты также загружался графитовый бой для создания восстановительной атмосферы.

После расплавления загруженной шихты осуществлялся ввод олова и дальнейший разогрев расплава до температуры 1140 – 1160 °С. Далее, при работающей на нагрев печи (для поддержания указанной температуры), осуществлялась продувка расплава аргоном в течение 5 минут.

По окончании продувки нагрузка с печи сбрасывалась, и расплав выдерживался в тигле в течение 7 минут. Параллельно с этим осуществлялся разогрев заливочной воронки до температуры 750 – 800 °С. После выдержки с поверхности расплава удалялся шлак и кусковой графит, корректировалась температура расплава (1100±5 °С).

Заливка металла осуществлялась в литейную комбинированную форму, состоящую из двух частей: стальной рубашки (изложница) и графитового наполнителя (рис. 9) через заливочную воронку с двухслойным сетчатым фильтром (размер ячеек 2 мм), разогретую до 800 °С. Ультразвуковой генератор включался перед заливкой металла в форму, резонансная частота составляла 20 – 23 кГц.

В ходе опытно промышленного опробования было изготовлено 3 слитка.

Из каждого слитка Ø90хØ120х160 мм из бронзы БрО10С2Н3 было вырезано по 10 пластин НП160.330. В соответствии с технической документацией по результатам их рентгенконтроля с помощью аппарата РАП 220-5 на режиме U=170кВ, I=2,5мА, t=900с. от каждого слитка годными были признаны 9 шт. и по одной пластине забраковано по наличию газовой пористости. При этом отсутствует закономерность в распределении пористости в объеме слитка.

По количеству и распределению эвтектоидной составляющей в микроструктуре сплава БрО10С2Н3 все пластины признаны годными.

В заключении ОАО «АК «Рубин» сделаны выводы:

1. Провести диффузионную сварку и испытания на трение образцов, полученных из опытных слитков, отлитых по технологии НИТУ «МИСиС».
2. ПЭО ОАО «АК «Рубин» провести расчет экономической эффективности от внедрения в производство новой технологии литья слитков из бронзы БрО10С2Н3.
3. Новую технологию литья слитков из бронзы БрО10С2Н3, предусматривающую совмещение протекания во времени операций направленной кристаллизации расплава (снизу вверх), перемешивания жидкого металла перед фронтом кристаллизации и повышения интенсивности затвердевания слитка в изложнице, внедрить в производство в условиях литейного цеха № 42 при положительных результатах расчета экономической эффективности и испытаний на трение.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ:

1. Установлено, что при обработке расплава БрО10С2Н3 ультразвуком (резонансная частота 20 – 23 кГц) количество эвтектоидной составляющей в структуре сплава увеличивается в 1,4 раза.
2. Свинец при литье бронзы БрО10С2Н3 в комбинированную литейную форму (стальная изложница, графитовый наполнитель) в поле ультразвуковых волн выделяется по границам зерен, как в сферической, так и в разветвленной форме. Никель и олово, имеющиеся в составе бронзы БрО10С2Н3, входят в состав α-фазы, а также в эвтектоид и в «темную» фазу около эвтектоида.
3. Разработана технология изготовления слитков из бронзы БрО10С2Н3 методом наполнительного литья, позволяющая совмещать, протекающие во времени процессы направленной кристаллизации сплава, перемешивания расплава перед фронтом кристаллизации и уменьшения градиента температуры по сечению слитка. При этом качество слитков полностью соответствует требованиям нормативной технической документации, а выход годного составляет 90 %.
4. Определены на основании расчетов и литературных данных технологические параметры, позволяющие получать достоверные результаты при моделировании в программе ProCast процессов литья и затвердевания слитков из сплава БрО10С2Н3, а также формирование температурных полей в отливке и литейной форме:

- температуры ликвидус и солидус сплава БрО10С2Н3 – 1023 °С и 968 °С, соответственно;
- плотность засыпки графита, при литье в комбинированную форму (стальная изложница, графитовый наполнитель) – 0,8 кг/м³;
- температура боковой поверхности изложницы при донном водяном охлаждении – 200 °С;
- длительность заливки расплава в литейную форму при донном водяном охлаждении – 20 с.

5. Экспериментально установлено, что теплопроводность графитового наполнителя зависит от его плотности. При этом минимальная зона столбчатых кристаллов образуется при насыпной плотности графита.
6. На базе современных методик и оборудования исследована структура бронзы БрО10С2Н3 в слитках Ø90хØ120х160 мм. Установлено, что макро- и микроструктура сплава и плотность слитка зависят от условий его затвердевания. При этом, чем больше скорость охлаждения при прочих равных условиях, тем больше в структуре сплава зона столбчатых кристаллов и объемная доля эвтектоида и меньше плотность слитка.

   Макроструктура состоит из двух основных зон: столбчатых и равноосных кристаллов.

Микроструктура сплава состоит из твердого раствора α-фазы, интерметаллидных фаз 89Cu-0,8Ni-8,5Sn; 53Cu-10Ni-37Sn и свинца.

7. Утепление каолиновой ватой внутренней поверхности прибыльной части изложницы позволяет эффективно реализовывать операцию долива расплава в форму и тем самым практически полностью устранить усадочную раковину в слитке и повысить выход годного в 2 раза, по сравнению с действующей технологией на ОАО «АК «Рубин».

Основные результаты работы представлены в публикациях:

1. Фарманов А. К., Белов В. Д., Белов Н. А., Алабин А. Н., Герасименко Е. А. Влияние висмута и свинца на микроструктуру и технологичность латуни Л70 при холодной прокатке// Цветные металлы.-2007.- № 3. – с. 99 – 103.
2. Герасименко Е. А., Коновалов А. Н., Белов В. Д. О затвердевании слитков из бронзы Бро10С2Н3 при литье в изложницу с донным водяным охлаждением//Литейщик России. – 2013. - № 7.- с. 15 – 17.
3. Герасименко Е. А., Белов В. Д., Гусева В. В., Коновалов А. Н. Влияние литейной формы на качество слитков, из оловянистой бронзы, затвердевающих в поле ультразвуковых волн // Литейщик России. – 2014.- №3.- с. 18 – 20.
4. Герасименко Е. А., Белов В. Д., Коновалов А. Н., Гусева В. В. Разработка методики для получения качественных слитков из Бро10С2Н3 методом объемно-направленной кристаллизации с использованием ультразвука (УЗО)./Труды 7 международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии». Москва, 2013. – с. 207 – 208.
5. Герасименко Е. А., Белов В. Д., Коновалов А. Н. Влияние ультразвуковой обработки на структуру сплава БРО10С2Н3 в слитках, изготавливаемых методом наполнительного литья./ Труды конференции «Литые материалы и ресурсосберегающие технологии», Владимир, 2013.
6. Герасименко Е. А., Белов В. Д., Белов Н. А., Лебедев Н. М. Ультразвуковая обработка расплава меди при литье слитков в изложницу./ Труды 7 международного научно – технического симпозиума. Самара, 2008. – с. 106 – 111.