

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ BrO10S2N3 НА ЕЕ СТРУКТУРУ

© 2016 г. В.Д. Белов, Е.А. Герасименко, В.В. Гусева, А.Н. Коновалов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

ОАО «Авиационная корпорация «Рубин», Московская обл.

Статья поступила в редакцию 22.11.14 г., доработана 23.12.14 г., подписана в печать 19.01.15 г.

Оловянистые бронзы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности для изготовления деталей, работающих в условиях трения. Так, в бронзе BrO10S2N3 при производстве деталей ответственного назначения регламентируется распределение эвтектидной составляющей. В работе исследовано влияние условий литья и затвердевания слитков на распределение и количество эвтектоида в структуре сплава. При этом было опробовано несколько видов литья бронзы в форму: как с водяным охлаждением, так и без него; с применением ультразвуковых волн и без них. В результате разработан способ литья оловянистой бронзы BrO10S2N3 в комбинированную литейную форму, находящуюся в поле ультразвуковых волн. Сама форма представляет собой стальную изложницу, помещенную в графитовый наполнитель, с теплоизоляционной вставкой в верхней части формы. Полученные результаты показали, что применение новой технологии позволяет получать слитки в полном соответствии с требованиями нормативной документации и с высоким выходом годного – более 70 %.

Ключевые слова: оловянистая бронза, эвтектоид, ультразвук, графит, литье, охлаждение, фаза.

Белов В.Д. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Литейные технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: vdbelov@mail.ru.

Герасименко Е.А. – инженер той же кафедры. E-mail: gea99a@mail.ru.

Коновалов А.Н. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: konovalov.ltm@mail.ru.

Гусева В.В. – канд. техн. наук, зам. гл. металлурга ОАО «Авиационная корпорация «Рубин» (143900, Московская обл., г. Балашиха, Западная промзона, шоссе Энтузиастов, 5). E-mail: verarubin@mail.ru.

Для цитирования: Белов В.Д., Герасименко Е.А., Гусева В.В., Коновалов А.Н. Влияние условий затвердевания заготовок из оловянистой бронзы BrO10S2N3 на ее структуру // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 2. С. 26–33. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-26-33.

Belov V.D., Gerasimenko E.A., Guseva V.V., Konovalov A.N.

Effect of solidification conditions for castings of BrO10S2N3 tin bronze on their structure

Tin bronzes are widely used in various industries to produce parts running under friction conditions. Thus, eutectoid component distribution is specified for BrO10S2N3 bronze used for critical part manufacturing. The paper studies the effect of casting and ingot solidification conditions on the distribution and amount of eutectoid in the alloy structure. Several ways of bronze die casting were tested, including ones with water cooling and without it; using ultrasonic waves and without them. As a result, we developed the method of BrO10S2N3 tin bronze casting into a combined mold subjected to ultrasonic waves. The mold is a steel casting form placed in graphite filler with an insulating insert at the top of the mold. The results showed that the new technology allows producing ingots that fully meet the requirements of regulatory documents and have a high yield exceeding 70 %.

Keywords: tin bronze, eutectoid, ultrasound, graphite, casting, cooling, phase.

Belov V.D. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of foundry technologies and art processing of materials, National University of Science and Technology «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninsky prospekt, 4). E-mail: vdbelov@mail.ru.

Gerasimenko E.A. – Engineer of the same Department. E-mail: gea99a@mail.ru.

Konovalov A.N. – Cand. Sci., Associate Professor of the same Department. E-mail: konovalov.ltm@mail.ru.

Guseva V.V. – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Chief Metallurgist, AK «Rubin» (143900, Moscow region, Balashikha, Zapadnaja promzona, Shosse Jentuziastov, 5). E-mail: verarubin@mail.ru.

Citation: Belov V.D., Gerasimenko E.A., Guseva V.V., Konovalov A.N. Vliyanie uslovii zatverdevaniya zagotovok iz olovyanistoi bronzy BrO10S2N3 na ee strukturu. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 2. P. 26–33. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-26-33.

Введение

Оловянистые бронзы благодаря хорошему сочетанию физических, механических и эксплуатационных свойств нашли широкое применение в

различных отраслях промышленности для изготовления деталей, работающих в условиях трения [1–5].

В настоящее время в системах торможения самолетов применяются бронзовые детали, которые являются элементами биметаллических стальных конструкций и работают в условиях антифрикционных нагрузок (рис. 1). Они изготавливаются механической обработкой заготовок — слитков. При этом многолетняя практика показывает, что структура сплава (например, бронзы БрО10С2Н3) бывает нестабильна в части содержания в ней эвтектоидной составляющей. Эвтектоидная составляющая в структуре бронзы должна быть равномерно распределена, а ее количество, согласно результатам расчета в программе ImageExpert Pro 3, должно составлять 4,5–9,0 %.

По равновесной диаграмме состояния Cu—Sn основными структурными составляющими сплава являются α -твердый раствор и, в зависимости от температуры, промежуточные интерметаллидные фазы β , γ , δ и ϵ . Фазы β и γ являются высокотемпературными и при охлаждении претерпевают эвтектоидный распад $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$, который осуществляется при температуре 586 °С, и $\gamma \rightarrow \alpha + \delta$ — при $t = 520$ °С [1, 3]. При содержании олова более 8 % структура сплава состоит из α -твердого раствора и эвтектоида ($\alpha + \delta$).

При анализе литературных данных было установлено, что на свойства литейных оловянистых бронз существенное влияние оказывают размер и форма зерна α -раствора, расположение и дисперсность эвтектоида. При этом размеры и количество выделений последнего в структуре сплава зависят не только от содержания олова, но и от условий затвердевания самого слитка: чем быстрее оно происходит, тем больше количество эвтектоида и дисперснее его частицы [1, 3, 6].

Цель настоящей работы — оценка влияния различных условий кристаллизации сплава и затвер-



Рис. 1. Биметаллическое изделие с бронзой БрО10С2Н3

девания слитка на количество и распределение эвтектоидной составляющей в структуре оловянистой бронзы.

Методика исследований

В настоящее время в промышленности наиболее распространенным способом получения заготовок из оловянистых бронз является литье в изложницу с водоохлаждаемым дном. Анализ этой технологии показал, что качество изготавливаемых по ней слитков, в частности количество эвтектоида в структуре сплава, зависит от большого числа технологических факторов, таких как температура и расход воды, скорость и температура литья металла и т.д. Повышенная чувствительность к ним структуры сплава связана с тем, что в процессе затвердевания теплоотвод от донной части слитка постоянно уменьшается в силу нарастания твердой фазы, при этом увеличивается расстояние от фронта кристаллизации до теплоотводящей донной части изложницы. В связи с этим температурный градиент на фронте кристаллизации бронзового расплава постоянно меняется, что приводит к нестабильности в распределении эвтектоида в объеме слитка при производстве заготовок.

Так, например, при исследовании структуры бронзы БрО10С2Н3 в слитке были выявлены зоны с точечным или неравномерным его распределением (рис. 2), что не соответствует эталонным фотографиям структуры сплава. По этой причине данные слитки бракуются. В целом величина отбракованных литых заготовок, в том числе и по структуре сплава, в реально действующем производстве может достигать до 70 %.

Исходя из анализа литературных данных, как было отмечено выше, управлять количеством и размером эвтектоида в структуре оловянистой бронзы можно, варьируя интенсивность затвердевания слитка. В связи с этим для увеличения скорости кристаллизации сплава и принимая во внимание, что получаемые слитки должны быть плотными, был разработан метод литья в изложницу с объемно-водяным охлаждением (разновидность метода Лаврова) [7, 8] (рис. 3).

При проведении эксперимента по изготовлению слитка из бронзы БрО10С2Н3 в условиях опытного производства инженерингового центра «Литейные технологии и материалы» (ИЦ ЛТМ) НИТУ «МИСиС» литье осуществлялось при сле-

дующих технологических параметрах: температура заливаемого металла 1090—1100 °С; температура воды на входе 20—25 °С, на выходе 35—40 °С; обе-

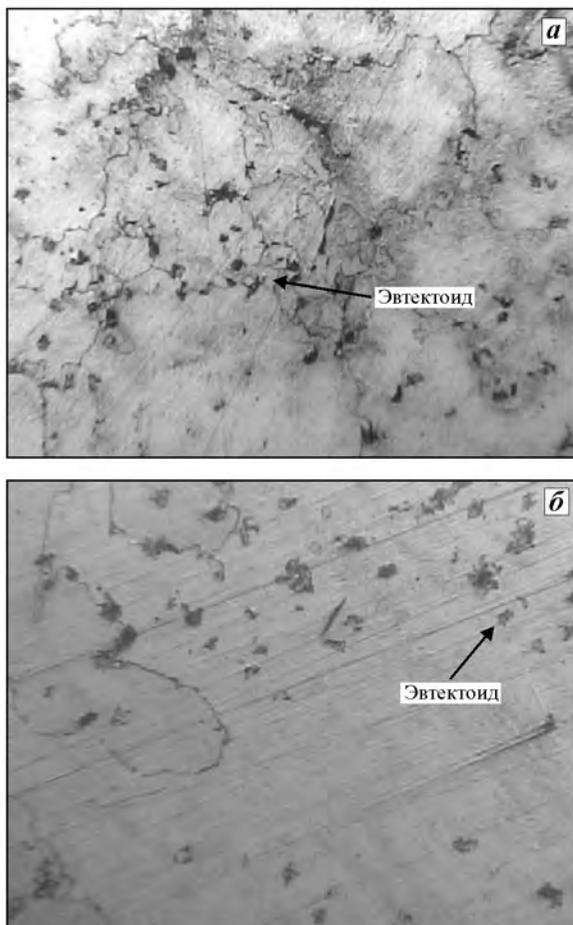


Рис. 2. Распределение эвтектоида в образцах, полученных литьем в изложницу с водоохлаждаемым дном
а – неравномерное распределение, *б* – точечный эвтектоид

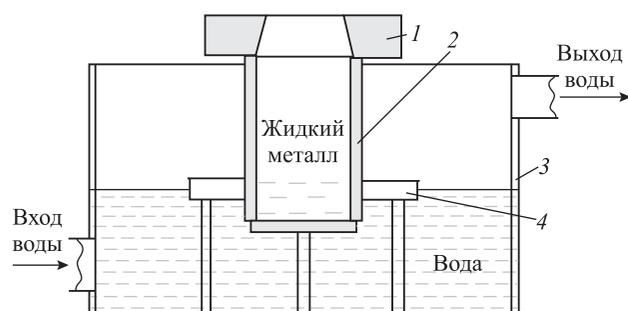


Рис. 3. Схема литья слитков методом направленного затвердевания с объемно-водяным охлаждением изложницы

1 – надставка из холодно-твердеющей смеси, *2* – стальная изложница, *3* – емкость с охлаждающей жидкостью, *4* – стальной стол

спечение синхронного подъема уровней металла и воды в течение всего процесса.

Эксперименты проводили на бронзе БрО10С2НЗ, имеющей следующий химический состав, мас. %: 9,0—11,0 Sn, 2,0—3,2 Pb, 3,0—4,0 Ni, остальное Cu; примеси, не более, мас. %: 0,3 Sb, 0,3 Fe, 0,02 Al, 0,02 Si, 0,02 Bi, 0,1 P и 0,5 Zn, суммарно – 1,2 %.

Макроструктуру исследовали после травления продольного разреза слитка персульфатом аммония в водном растворе при $t = 70 \div 80$ °С.

Анализ микроструктуры сплава на шлифах (травитель FeCl₃ в 10 %-ном растворе HCl) выполняли с использованием микроскопа «Neophot-32», оснащенного окуляром с цифровой камерой. Количественную оценку объемной доли эвтектоидной составляющей в структуре сплава осуществляли по фотографиям с помощью компьютерной программы ImageExpert Pro 3, где оценивалась доля площади, занимаемая ею, и методом случайных секущих.

Результаты и их обсуждение

По результатам экспериментов было установлено следующее.

1. Макроструктура сплава в слитке (рис. 4) состоит из двух зон: зоны столбчатых кристаллов и зоны равноосных кристаллов со средним размером зерен 10 и 2,2 мм соответственно. Следует отметить, что первая из них не допускается технологической документацией на изготовление литых деталей, работающих в условиях трения в конструкциях биметаллических изделий. Поэтому ее наличие резко снижает выход годного и увеличивает трудоемкость механической обработки.

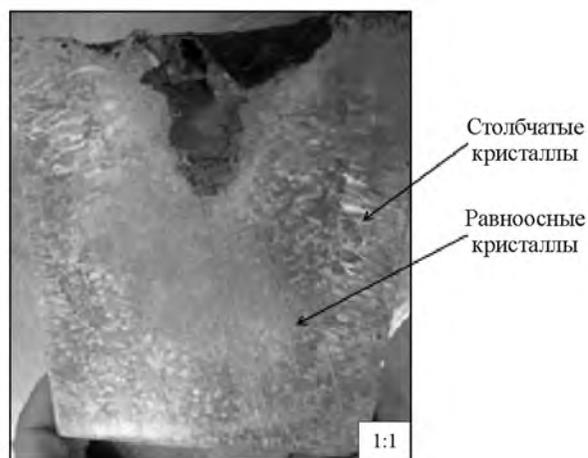


Рис. 4. Макроструктура слитка бронзы БрО10С2НЗ, полученного при объемно-водяном охлаждении

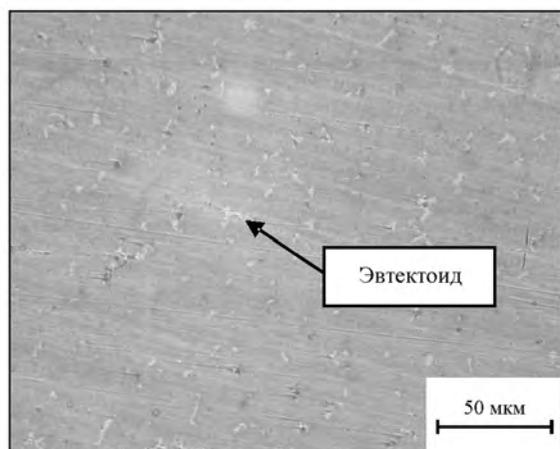


Рис. 5. Микроструктура бронзы BrO10C2H3 в слитке, полученном в изложнице с объемно-водяным охлаждением

2. Эвтектоидная составляющая в структуре бронзы BrO10C2H3 представляет собой мелкодисперсные включения. Их оценка в программе ImageExpert Pro 3 оказалась невозможной. Размер эвтектоида, определенный методом случайных срезов, составил около 4 мкм.

3. Анализ структуры сплава в полученных слитках не позволяет признать их годными (рис. 5).

Таким образом, вышеуказанным методом литья, основанным на регулировании отвода тепла от фронта кристаллизации сплава путем синхронного подъема уровней металла в изложнице и охлаждающей воды вокруг нее в течение всего цикла, не удалось получить слитки из бронзы BrO10C2H3 с требуемыми макроструктурой, количеством, размером и распределением эвтектоидной фазы в структуре материала. Вероятно, это связано с очень интенсивным охлаждением изложницы в период кристаллизации сплава и наличием значительного градиента температуры по сечению слитка, что подтверждается обширной зоной столбчатых кристаллов (более 1/3 объема слитка) и глубокой концентрированной усадочной раковины (около 1/3 высоты слитка). Интенсивное охлаждение приводит к тому, что процесс кристаллизации сплава протекает в условиях сильной неравновесности. Это, в свою очередь, вызывает пересыщение оловом фазы α -твердого раствора, снижение температуры эвтектоидного превращения и, как следствие, повышение количества и дисперсности эвтектоида в структуре бронзы.

Однако следует отметить, что плотность всех изготовленных слитков была удовлетворительной и полностью отвечала требованиям конструктор-

ской документации, предъявляемым к качеству литых деталей.

Сравнивая структуры бронзы BrO10C2H3 в слитках, изготовленных методами направленной кристаллизации с донным и объемным водяным охлаждением изложницы, можно заключить, что во втором случае формируется более мелкий эвтектоид (около 4 мкм) и распределяется в зоне равноосных кристаллов равномерно. При этом в слитках имеется большая зона столбчатых кристаллов, которая приводит к существенному (до 30 %) снижению выхода годного.

Таким образом, можно заключить, что объемное водяное охлаждение изложницы положительно влияет на равномерность распределения и количество эвтектоидной фазы в структуре бронзы BrO10C2H3, но при этом возникает и требует решения вопрос повышения выхода годного, в том числе и за счет уменьшения глубины усадочной раковины. Следовательно, при литье необходимо реализовать процесс затвердевания слитка таким образом, чтобы, с одной стороны, проходила направленная кристаллизация сплава, а с другой — минимизировался градиент температуры по горизонтальному сечению слитка при одновременном обеспечении высокой скорости кристаллизации сплава.

При анализе литературных данных было установлено, что в ходе кристаллизации благоприятное воздействие на структуру и свойства сплава оказывает ультразвуковая (УЗ) обработка расплава [9, 10, 12]. Ультразвук — это упругие колебания с частотой выше 16 кГц. Вводимые в расплав, они способствуют его дегазации, дополнительному перемешиванию и препятствуют концентрации неметаллических включений на границах зерен [9, 10].

Принимая во внимание наличие перемешивания расплава при обработке ультразвуком, в данной работе были проведены исследования его влияния на структуру бронзовых заготовок, получаемых литьем в стальную изложницу. При этом для достижения высокой скорости охлаждения расплава в ходе кристаллизации сплава применяли способ литья в изложницу с объемно-водяным охлаждением. Температурные параметры литья для бронзы BrO10C2H3 соответствовали ранее установленным и были указаны выше.

Продольный разрез слитка, отлитого по данной методике, представлен на рис. 6. Из его данных следует, что зона столбчатых кристаллов в структуре сплава практически отсутствует и состоит из

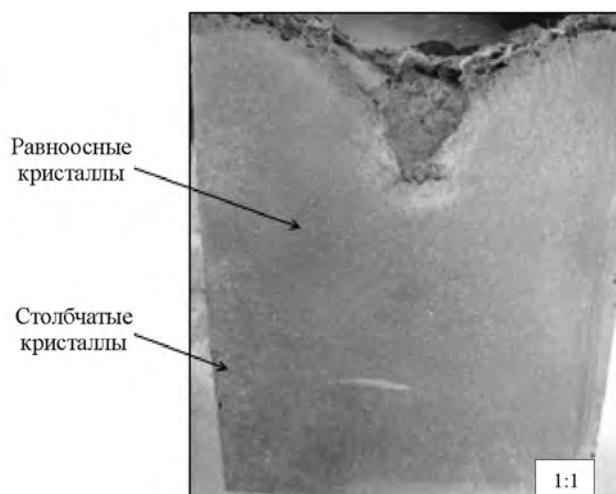


Рис. 6. Макроструктура слитка, полученного литьем бронзы БрО10С2Н3 в стальную изложницу с объемно-водяным охлаждением и применением УЗ-обработки

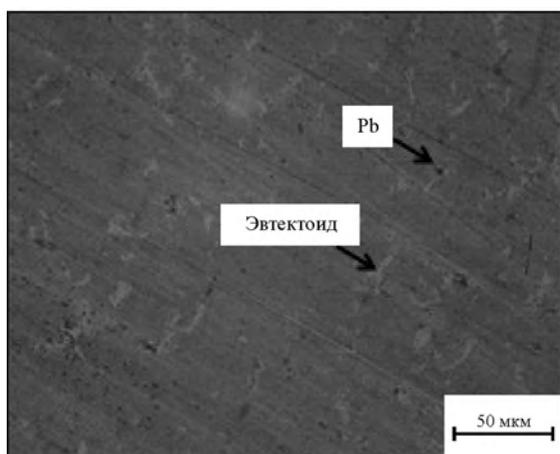


Рис. 7. Микроструктура бронзы БрО10С2Н3 в слитке, полученном литьем в стальную изложницу с объемно-водяным охлаждением и применением УЗ-обработки

мелких кристаллов размером 5–7 мм. Зона равноосных кристаллов занимает практически весь объем слитка, размер кристаллов в ней составляет около 1 мм. Глубина усадочной раковины не превышает 40 мм, а это почти в 2 раза меньше, чем в случае литья слитков в изложницу с объемно-водяным охлаждением без УЗ-обработки расплава в процессе его кристаллизации.

Анализ микроструктуры сплава в слитке показал, что объемная доля эвтектоидной фазы в структуре сплава БрО10С2Н3 составляет 8,0–8,5 % и в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым технологической документацией к литым заготовкам.

Методом случайных секущих был определен

средний размер эвтектоидной составляющей, составивший около 12 мкм, что в 3 раза больше, чем при литье без УЗ-обработки расплава, и практически соответствует среднему размеру этой фазы. При этом следует особо подчеркнуть, что распределение эвтектоида во всем объеме слитка равномерное (рис. 7), что позволяет сделать предположение о возможном благоприятном влиянии данного факта на эксплуатационные свойства сплава (износостойкость).

Отмеченные увеличение размера и равномерное распределение эвтектоидной составляющей в структуре сплава во всем объеме слитка подтверждают предположение о перемешивании расплава в поле ультразвуковых волн, в том числе и на фронте кристаллизации. Именно перемешивание всего объема расплава в изложнице уменьшает температурный градиент по сечению слитка и одновременно повышает температуру начала кристаллизации сплава вследствие снижения температуры переохлаждения жидкого металла. Это, в свою очередь, приводит к увеличению до 12 мкм среднего размера эвтектоидной составляющей по сравнению с его величиной (4 мкм) в структуре образцов, отлитых без УЗ-обработки расплава.

Анализируя в целом полученные результаты и технологию изготовления слитков из бронзы БрО10С2Н3 методом литья в изложницу с объемно-водяным охлаждением в поле ультразвуковых волн, следует отметить, что УЗ-обработка расплава положительно влияет на структуру сплава, но не позволяет получать слитки в полном соответствии с требованиями нормативной документации по газовой пористости. Кроме того, использовать данный метод изготовления слитков в серийном производстве оказалось технически сложно из-за необходимости синхронизации подъема металла в изложнице с уровнем охлаждающей воды в ванне. При этом необходим контроль температурных параметров в течение всего процесса затвердевания слитка.

Исследования по упрощению данной технологии позволили разработать способ литья бронзы в комбинированную литейную форму (рис. 8) без использования охлаждающей воды. При создании ее конструкции базировались на результатах экспериментов по литью слитков с донным и объемным водяным охлаждением изложницы, в том числе и с применением ультразвуковой обработки расплава. При этом учитывали требования конструкторско-технологической документации

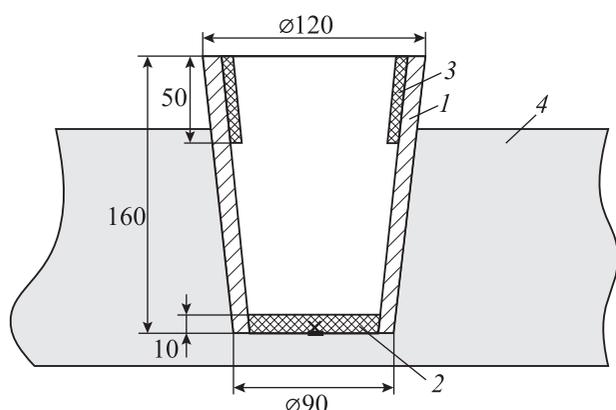


Рис. 8. Схема экспериментальной комбинированной литейной формы

1 – стальная изложница, 2 – графитовая вставка, 3 – теплоизоляционная вставка, 4 – графитовый наполнитель

к качеству слитка, а также к структуре бронзы БрО10С2Н3 в части обеспечения размера, количества и распределения эвтектоидной составляющей.

Для получения требуемой структуры сплава интенсивность охлаждения расплава в изложнице должна быть больше, чем при литье в форму с донным водяным охлаждением, но меньше, чем при литье в изложницу с объемным водяным охлаждением в поле УЗ-волн. Такие условия, как показал анализ литературных данных, могут быть достигнуты при замене объемного водяного охлаждения формы на ее охлаждение в объеме графитового порошка.

Моделированием процесса затвердевания слитка из бронзы БрО10С2Н3 в комбинированной форме было установлено, что минимальная зона столбчатых кристаллов в его структуре образуется при насыпной плотности графитового порошка, т.е. при малой интенсивности теплоотвода от внешней поверхности изложницы. Кроме того, из результатов моделирования (рис. 9) видно, что при литье в комбинированную форму можно реализовать процесс направленной кристаллизации сплава при затвердевании отливки — снизу вверх. Донная часть формы максимально прогрета вследствие интенсивного отвода тепла от изложницы в плотный графит, а боковая — менее прогрета из-за слабого теплоотвода в графитовый порошок насыпной плотности (наполнитель).

Литьем расплава в комбинированную литейную форму (рис. 10) при температуре 1100 ± 5 °С с применением ультразвука (резонансная частота 20–23 кГц) было отлито 3 слитка из бронзы БрО10С2Н3. В качестве примера на рис. 11 пред-

ставлен продольный разрез одного из них. Как и в рассмотренных выше образцах, макроструктура состоит из двух зон. Однако зона столбчатых кристаллов не имеет ярко выраженного характера, ее размер в продольном сечении слитка составляет около 10 мм, вся остальная его площадь занята равноосными кристаллами менее 1 мм.

В данном слитке объемная доля эвтектоида в структуре бронзы БрО10С2Н3 составляет около 4,8–5,0 % (рис. 12), а размер — порядка 11 мкм, при этом его распределение по сечению слитка равномерное.

Таким образом, применение упрощенной технологии (литье бронзы БрО10С2Н3 в комбинированную литейную форму без использования охлаждающей воды) позволяет получать слитки требуемого качества по распределению, количеству и размеру эвтектоидной составляющей. При этом слитки получаются плотными, и выход годного превышает 70 %.

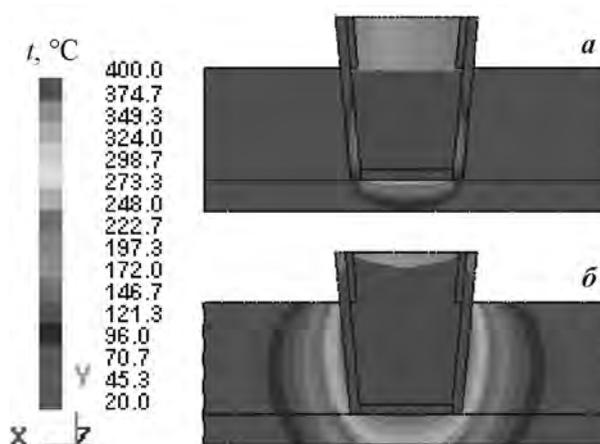


Рис. 9. Распределение температуры в графитовом наполнителе при литье в комбинированную форму слитка из бронзы БрО10С2Н3

а – продолжительность обработки ультразвуком – 10 с, б – 400 с

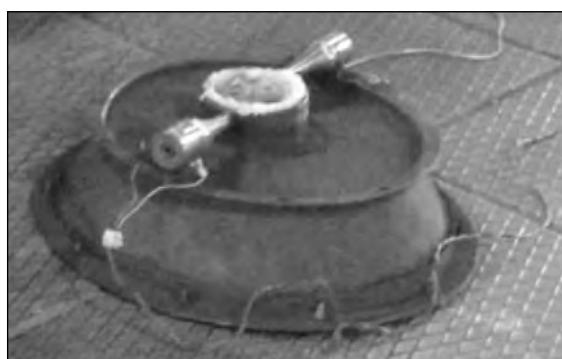


Рис. 10. Комбинированная литейная форма с ультразвуковыми излучателями

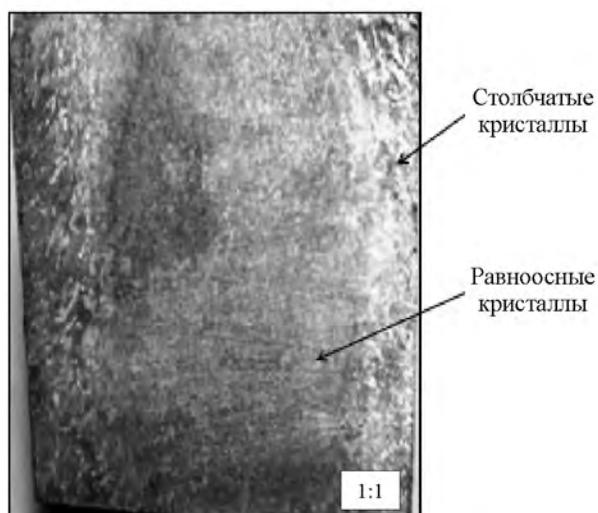


Рис. 11. Макроструктура сплава BrO10C2N3 в слитке, полученном при литье в комбинированную литейную форму (стальная изложница – графит) в поле ультразвуковых волн

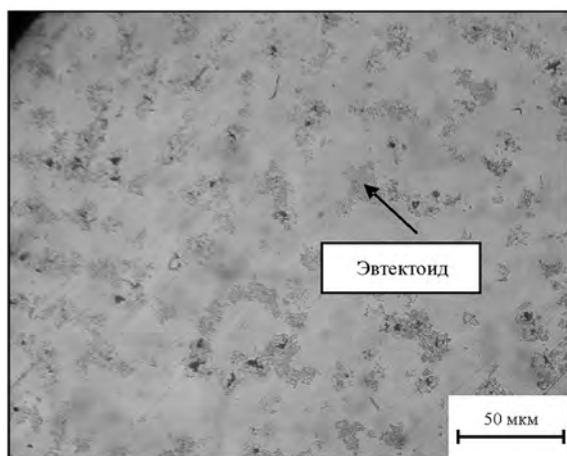


Рис. 12. Микроструктура бронзы BrO10C2N3, полученная литьем в комбинированную литейную форму в поле ультразвуковых волн

Заключение

По результатам проделанной работы можно отметить, что повышение скорости охлаждения слитков из бронзы BrO10C2N3 и одновременное применение ультразвуковой обработки расплава приводят к укрупнению и увеличению количества эвтектидной составляющей в структуре сплава. Вероятно, это связано с тем, что при наложении ультразвука происходит дополнительное перемешивание расплава перед фронтом кристаллизации и, как следствие, уменьшение градиента температуры по сечению слитка, что в целом способствует еще большей неравновесности процесса кристаллизации.

Литье бронзы BrO10C2N3 в комбинированную литейную форму в поле ультразвуковых волн позволяет получать слитки в полном соответствии с требованиями нормативной документации и с высоким выходом годного (более 70 %).

Работа выполнена в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок) государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности на 2014–2016 гг. (задание № 2014/113).

Литература

1. *Осинцев О.Е., Федоров В.Н.* Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. М.: Машиностроение, 2004.
2. *Mehmet Sirac Ozerdem, Sedat Kolukisa.* Artificial neural network approach to predict the mechanical properties of Cu–Sn–Pb–Zn–Ni cast alloys // *Mater. Design.* 2009. Vol. 30. P. 764–769.
3. *Лякишев Н.П., Банных О.А.* Диаграммы состояния двойных металлических систем. М.: Машиностроение, 1997. Т. 2.
4. *Empl D., Laporte V., Vincent E., Dewobroto N., Mortensen A.* Improvement of elevated temperature mechanical properties of Cu–Ni–Sn–Pb alloys // *Mater. Sci. Eng. A.* 2010. Vol. 527. P. 4326–4333.
5. *Кестнер О.Е.* Поведение некоторых медных сплавов при трении // *Исследования сплавов цветных металлов: Сборник No. 3.* М.: Машиностроение, 1962.
6. *Мартюшев Н.В., Семенов И.В.* Структура и свойства бронзовых отливок при различных скоростях охлаждения // *Современные проблемы науки и образования.* 2012. No. 6. С. 12–15.
7. *Герасименко Е.А., Белов В.Д., Коновалов А.Н.* Влияние ультразвуковой обработки на структуру сплава BrO10C2N3 в слитках, изготавливаемых методом наполнительного литья // *Матер. конф. «Литые материалы и ресурсосберегающие технологии».* Владимир: Изд-во ВлГУ, 2013. С. 105–107.
8. *Герасименко Е.А., Коновалов А.Н., Белов В.Д.* О затвердевании слитков из бронзы BrO10C2N3 при литье в изложницу с донным водяным охлаждением // *Литейщик России.* 2013. No. 7. С. 15–17.
9. *Грот А.Н., Красильников Д.А., Рассохин В.А., Твердов В.И.* Влияние ультразвуковой обработки расплава на структуру и свойства катанки из сплавов цветных металлов // *Металлург.* 2012. No. 10. С. 78–83.
10. *Эскин Г.И.* Ультразвуковая обработка расплавленно-го расплава. М.: Metallurgy, 1988.

11. Корчмит А.В., Егоров Ю.П. Способ травления оловянистой бронзы: Пат. 2272271 (РФ). 2006.
12. Абрамов О.В., Абрамов В.О., Артемьев В.В. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. М.: Янус, 2006.
13. Sergiy V. Divinski. Nano- and micro-scale free volume in ultrafine grained Cu—1wt%Pb alloy deformed by equal channel angular pressing // *Acta Mater.* 2009. Vol. 57. P. 5706—5717.
14. Изучение свойств сверхпроводящих свинцовых сплавов, обработанных ультразвуком. URL: eLib.kazntu.kz/sites/default/files/articles/shokovaeva_2006_1.pdf.
15. Xueping Guo, Ga Zhang, Wen-Ya Li, Lucas Dembinski, Yang Gao, Hanlin Liao, Christian Coddet. Microstructure, microhardness and dry friction behavior of cold-sprayed tin bronze coatings // *Appl. Surf. Sci.* 2007. Vol. 254. Iss. 5. P. 1482—1488.
7. Gerasimenko E.A., Belov V.D., Kononov A.N. Vliyanie ul'trazvukovoi obrabotki na strukturu splava BRO10S2N3 v slitkakh, izgotavlivaemykh metodom napolnitel'nogo lit'ya [Effect of ultrasonic treatment on the structure of the alloy ingots BRO10S2N3 manufactured by molding the filler]. In: *Proc. Conf. «Liteye materialy i resursosberegayushchie tekhnologii»* [Alloy materials and energy saving technologies]. Vladimir: VISU, 2013. P. 105—107.
8. Gerasimenko E.A., Kononov A.N., Belov V.D. O zatverdevanii slitkov iz bronzy Bro10S2N3 pri lit'e v izlozhnitsu s donnym vodyanym okhlazhdeniem [On solidification of ingots of bronze Bro10S2N3 when casting into a mold with a bottom water-cooled]. *Liteishik Rossii.* 2013. No. 7. P. 15—17.
9. Grot A.N., Krasilnikov D.A., Rassoxin V.A., Tverdov V.I. Vliyanie ul'trazvukovoi obrabotki rasplava na strukturu i svoistva katanki iz splavov tsvetnykh metallov [Effect of ultrasonic treatment of the melt on the structure and properties of wire rods of ferrous alloys]. *Metallurg.* 2012. No. 10. P. 78—83.
10. Eskin G.I. Ul'trazvukovaya obrabotka rasplavlennogo rasplava [Ultrasonic treatment of the molten alloy]. Moscow: Metallurgiya, 1988.
11. Korchmit A.V., Egorov U.P. Sposob travleniya olovanistoi bronzy [A method of etching tin bronze]: Pat. 2272271 (RF). 2006.
12. Abramov O.V., Abramov V. O., Artemiev V.V. Moshnii ul'trazvuk v metallurgii i mashinostroyenii [Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering]. Moscow: Yanus, 2006.
13. Sergiy V. Divinski. Nano- and micro-scale free volume in ultrafine grained Cu—1wt%Pb alloy deformed by equal channel angular pressing. *Acta Mater.* 2009. Vol. 57. P. 5706—5717.
14. Izuchenie svoistv sverkhprovodyashchikh svintsovykh splavov, obrabotannykh ul'trazvukom [Study of the properties of superconducting lead alloys, sonicated] URL: eLib.kazntu.kz/sites/default/files/articles/shokovaeva_2006_1.pdf.
15. Xueping Guo, Ga Zhang, Wen-Ya Li, Lucas Dembinski, Yang Gao, Hanlin Liao, Christian Coddet. Microstructure, microhardness and dry friction behavior of cold-sprayed tin bronze coatings. *Appl. Surf. Sci.* 2007. Vol. 254. Iss. 5. P. 1482—1488.

References

1. Osintsev O.E., Fedorov V.N. Med' i mednye splavy. Otechestvennyye i zarubezhnyye marki [Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2004.
2. Mehmet Sirac Ozerdem, Sedat Kolukisa. Artificial neural network approach to predict the mechanical properties of Cu—Sn—Pb—Zn—Ni cast alloys. *Mater. Design.* 2009. Vol. 30. P. 764—769.
3. Lyakishchev N.P., Bannix O.A. Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskiykh sistem [The phase diagrams of binary metallic systems]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1997. Vol. 2.
4. Empl D., Laporte V., Vincent E., Dewobroto N., Mortensen A. Improvement of elevated temperature mechanical properties of Cu—Ni—Sn—Pb alloys. *Mater. Sci. Eng. A.* 2010. Vol. 527. P. 4326—4333.
5. Kestner O.E. Povedenie nekotorykh mednykh splavov pri trenii [The behavior of certain copper alloys by friction]. In: *Issledovanie splavov tsvetnykh metallov* [Research non-ferrous alloys]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1962.
6. Martushov N.V., Semenov I.V. Struktura i svoistva bronzovykh otlivok pri razlichnykh skorostyakh okhlazhdeniya [Structure and properties of bronze castings at different cooling rates]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2012. No. 6. P. 12—15.