

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БРОНЗОВЫХ ОТЛИВОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ

Мартюшев Н.В., Семенов И.В.

*ГФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: martjushev@tpu.ru*

Работа посвящена изучению влияния условий кристаллизации на структуру бронзы БрОС10-10 и её механические свойства. Условия кристаллизации менялись путем изменения скорости охлаждения расплава. Использовался предварительный нагрев литейных форм до различных температур. В ходе работы изучены основные закономерности формирования структуры бронзы марки БрОС 10-10 при разных скоростях охлаждения. Также были установлены зависимости предела прочности и циклической долговечности от скорости охлаждения отливки. Результаты исследований показали, что циклическая долговечность и предел прочности бронзовых отливок значительно изменяются при различных скоростях охлаждения. Максимальной прочностью на растяжение обладают отливки, полученные с максимальной скоростью охлаждения (в кокиль). Снижение скорости охлаждения приводит до 30-40 °С/с к снижению прочности более чем в 2 раза. При этом отличия в значениях циклической долговечности могут достигать 3-5 раз при различных скоростях охлаждения.

Ключевые слова: скорость охлаждения, кривые охлаждения, бронза, БрОС 10-10, предел прочности на растяжение, циклическая долговечность.

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF BRONZE CAST AT VARIOUS COOLING SPEEDS

Martyushev N.V., Semenov I.V.

*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30), e-mail: martjushev@tpu.ru*

Work is devoted to studying of crystallization conditions influence on structure of lead-tin bronze and its mechanical properties. Conditions of crystallization changed by change of melt cooling speed. Preliminary heating of casting molds to various temperatures was used. During work the main regularities of formation of structure of bronze of lead-tin bronze brand are studied at different cooling speeds. As dependences of strength and cyclic durability on casting cooling speed were established. Results of researches showed that the cyclic durability and strength of bronze cast considerably change at various cooling speeds. The maximum durability on stretching the coolings received with the maximum speed (in iron mold) possess casting. Decrease in cooling speed leads to 30-40 °C/s to decrease in durability more than in 2 times. Thus differences in values of cyclic durability can reach 3-5 times at various cooling speeds.

Key words: speed of cooling, curve coolings, bronze, lead-tin bronze, strength, cyclic durability.

### Введение

Проблема низкой прочности изделий, изготовленных из антифрикционных марок бронз, является ключевой для узлов деталей машин, работающих на трение и износ в условиях значительных нагрузок и давлений. Примерами таких деталей могут служить венцы зубчатых колес редукторов, подшипники скольжения в автомобилях, уплотнительные кольца компрессоров и насосов. Уникальность таких бронз заключается в их очень низком коэффициенте трения по закаленной стали. Относительно низкая прочность таких бронз значительно ограничивает сферу их применения. Это подтверждается публикациями как отечественных [4], так и зарубежных авторов [5; 6].

Известно, что свойства литых бронз определяются их составом и условиями кристаллизации. Среди уже проведенных работ присутствует множество рекомендаций по выбору химического состава бронз под конкретные условия. Но вопросы выбора оптимальных условий кристаллизации для трех- и более компонентных бронз, работающих одновременно на износ и разрушение, остаются открытыми. Стоит отметить, что для сложнолегированных бронз такие их свойства, как ударная вязкость и циклическая долговечность, изучены слабо либо не исследованы.

### **Материал и методы исследования**

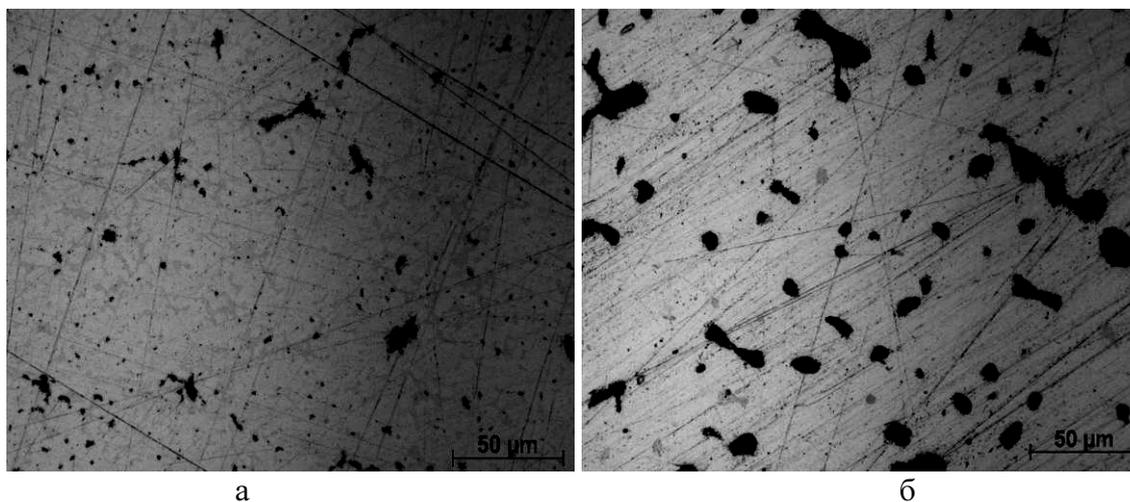
В данной работе сделана попытка восполнить недостаток знаний в данной области. Было проведено исследование влияния скорости охлаждения расплава на структуру, механические и триботехнические свойства бронзы марки БрОС10-10. Данная марка была выбрана ввиду её широкого применения, в том числе и в условиях переменных циклических нагрузок. Состав этой бронзы: 10% олова, 10% свинца, 0,5% раскислителя и остальное медь. Раскисление проводилось фосфористой медью перед закладкой свинца в расплав.

Методика плавки и заливки бронзового расплава подробно описана в [3]. Изменение скоростей охлаждения осуществлялось с помощью изменения температуры нагрева литейной формы. При проведении исследований в графитовые литейные формы, нагретые до различных температур (20, 200, 400, 600, 800 °С), заливался расплав. Скорость охлаждения расплава при этом измерялась с помощью прибора «Термограф» по методике, описанной в [1]. Для проведения большинства механических испытаний использовались стандартные методики ГОСТа. Расчет количественных характеристик параметров микроструктуры производился с помощью программных средств и методик, изложенных в [2]. Фазовый состав определялся с помощью рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA. Химический анализ фаз и фрактограммы поверхности шлифов отливок были сделаны с помощью растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 с микроанализатором EDS X-Act (Oxford Instruments). Предел прочности рассчитывали с использованием испытательной машины МИРИ-100К (Россия) с компьютерным управлением и расчётом механических характеристик. Механические характеристики определяли при использовании схемы одноосного растяжения по ГОСТ 1497-84 на цилиндрических образцах с галтелями типа III с диаметром рабочей части 5 мм. Усталостные испытания проводились с помощью универсальной системы типа Instron 8801.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

На основании данных проведенных металлографических исследований можно сделать вывод о том, что скорость охлаждения в значительной мере влияет на структуру бронзовых

отливок. Изменяется фазовый состав, а также морфология фаз. Бронза БрОС 10-10 при охлаждении «литье в кокиль» состоит из матрицы –  $\alpha$ -твердого раствора, эвтектоида на основе электронного соединения  $Cu_{31}Sn_8$  и выключений свинца. На рис. 1 представлена структура такой бронзы, полученной с различными скоростями охлаждения. На фоне светлой матрицы твердого раствора видны черные включения свинца и серые включения эвтектоида.



**Рис. 1. Микроструктура бронзы марки БрОС 10-10 залитых в форму:**

а – с температурой 20 °С (скорость охлаждения 158 °С/с);

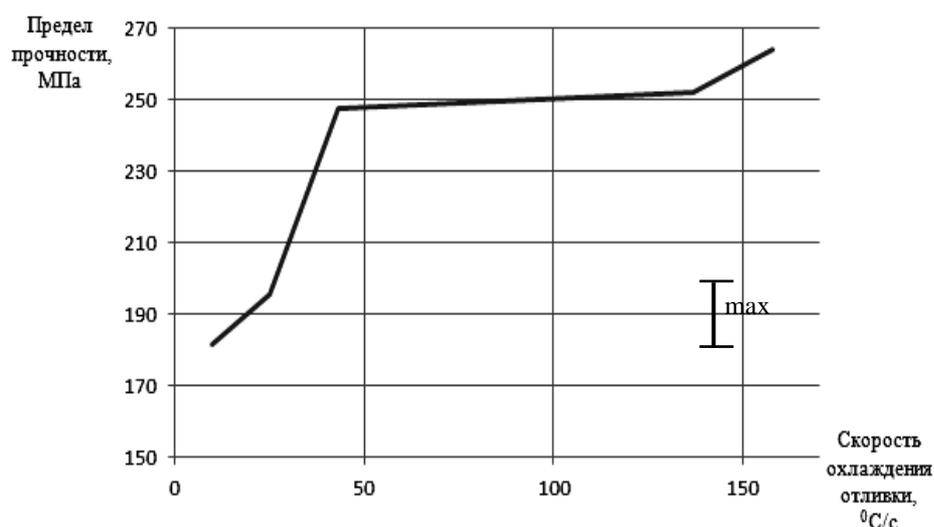
б – с температурой 800 °С (скорость охлаждения 10 °С/с).

Наиболее твердой фазой в такой бронзе является эвтектоид. С помощью фотографий микроструктуры был проведен количественный компьютерный анализ. Он показал, что низкая скорость охлаждения (10-40 °С/с) приводит к практически полному исчезновению эвтектоида (табл. 1), высокая скорость (120-150 °С/с), наоборот, дает максимальное его количество в пределах 10% (по площади). Данные металлографического анализа подтверждает рентгенофазовый анализ. Количественная зависимость количества эвтектоида от скорости охлаждения показана на рис. 3. Косвенно увеличение количества эвтектоида при росте скорости охлаждения подтверждается данными химического анализа фаз. При скорости охлаждения 158 °С/с эвтектоид состоит из 24,8% олова и 75,2% меди (табл. 1),  $\alpha$ -твёрдый раствор на основе меди содержит 4,6% олова. При 10 °С/с состав эвтектоида остается тем же – 25,3% олова и 74,7% меди, а состав  $\alpha$ -твёрдого раствора изменяется, в нем содержится уже 9,7% олова. Кроме того, в значительной мере изменяется форма мягких свинцовых включений. Высокая скорость охлаждения привела к образованию большого количества мелких разветвленных включений свинца с рваной межфазной поверхностью, низкая – к образованию в структуре сферообразных включений легкоплавкой фазы с гладкой межфазной поверхностью.

**Таблица 1 – Зависимость содержания эвтектоида от средней скорости охлаждения расплава бронзы БрОС10-10**

Скорость охлаждения отливки, °С/с	Содержание эвтектоида, %
158	15
137	12
45	7
25	5
10	3

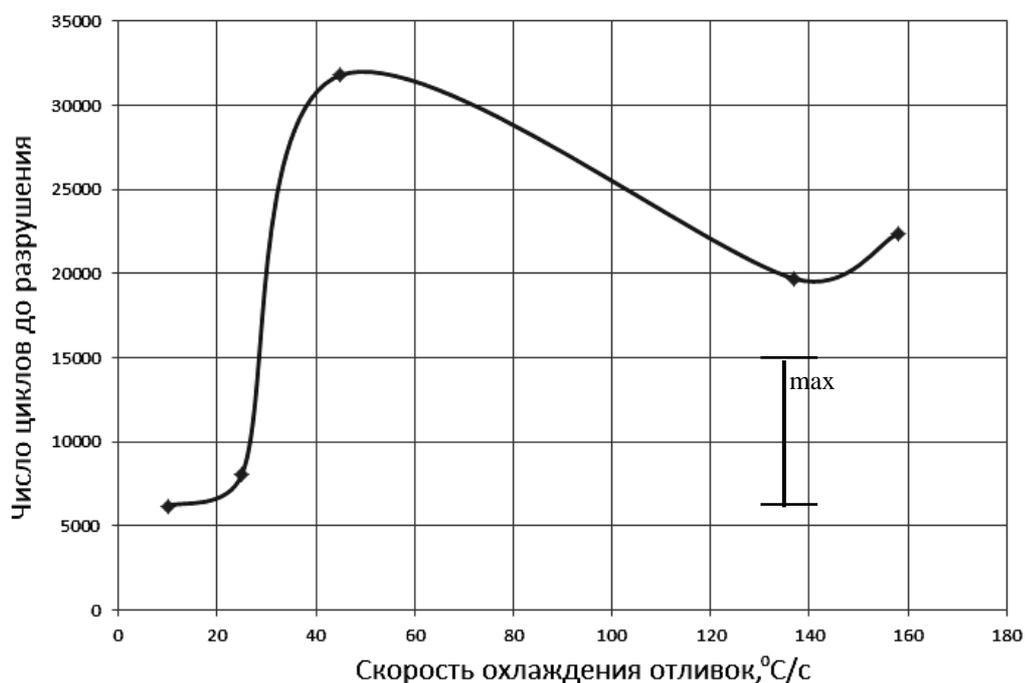
Свинец практически не растворяется ни в одном из компонентов бронзы и образует включения, значительно снижающие прочностные характеристики бронзы. На прочность бронз будет влиять не только количество свинца, но также форма и размер свинцовых включений, формирование которых определяется рядом технологических факторов (температурой заливки, скоростью охлаждения и др.). Сфероидизация свинцовой фазы для бинарных свинцовистых бронз приводит к улучшению механических свойств. Однако для свинцово-оловянистых бронз при низких скоростях охлаждения параллельно со сфероидизацией свинца идёт процесс уменьшения количества эвтектоида. В бронзе БрОС 10-10 эвтектоидом является электронное соединение  $Cu_8Sn_{31}$ , которое обладает большей твёрдостью, чем основная матрица отливки образца. Отсюда при малых скоростях охлаждения, с одной стороны, за счёт сфероидизации свинца должно происходить улучшение механических свойств, с другой стороны, за счёт уменьшения количества твёрдого эвтектоида механические свойства должны ухудшаться. Как видно из рис. 2, при уменьшении скорости охлаждения отливки предел прочности уменьшается.



**Рис. 2. Зависимость предела прочности от скорости охлаждения отливки.**

Отсюда можно сделать вывод о том, что на механические свойства свинцово-оловянистых бронз решающее влияние оказывает количество эвтектоида, а не форма и размер включений свинца.

Подобное влияние оказывает изменение условий кристаллизации на циклическую долговечность отливок. Испытания на циклическую долговечность проводились при частоте нагружения 5 Гц, нагрузка в цикле менялась от 0 до 1000 кг. Испытания проводились по четырем образцам на каждую нагрузочную точку. Результаты испытаний представлены на рис. 3.



**Рис. 3. Зависимость циклической долговечности бронзы БрОС10-10 от скорости охлаждения отливки.**

Такой сложный характер зависимости можно объяснить теми же взаимопротиворечащими факторами: сфероидизацией свинцовых включений при уменьшении скорости охлаждения сплава, с одной стороны (что приводит к улучшению механических свойств), и уменьшением количества твёрдого эвтектоида, с другой стороны (это должно приводить к ухудшению механических свойств). Исходя из графика на рис. 3 можно сделать вывод о том, что максимальной циклической долговечностью будут обладать образцы, полученные со скоростью охлаждения 40-60 °C/c, что соответствует охлаждению на воздухе в форме, нагретой до 300-400 °C/c.

### **Выводы**

Проведенные исследования показали, что при работе бронзы в условиях циклических нагрузок форма низкопрочных включений свинца будет играть значительную роль, так как в данном случае его включения будут играть роль источников зарождения трещины. И с этой точки зрения более благоприятна низкая скорость охлаждения, дающая сферические включения свинца. Но в тоже время полное отсутствие эвтектоида в структуре при скоростях ниже 30 °С/с приводит к резкому падению циклической долговечности образцов. По результатам испытаний максимальной циклической долговечностью будут обладать образцы, полученные со скоростью охлаждения 40-60 °С/с, что соответствует охлаждению на воздухе в форме, нагретой до 300-400 °С/с.

### Список литературы

1. Мартюшев Н.В. Прибор и методика для определения скорости охлаждения расплава // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – С. 1-7. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/104-r6637>.
2. Мартюшев Н.В., Егоров Ю.П., Утьев О.М. // Обработка металлов. – 2003. – № 3. – С. 32-34.
3. Мартюшев Н.В., Петренко Ю.Н., Егоров Ю.П. Производство поршневых колец компрессоров высокого давления // Литейное производство. – 2008. – № 8. – С. 24-25.
4. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки : справочник. – М. : Машиностроение, 2004. – 336 с., ил.
5. Empl D., Laporte V., Vincent E., Dewobroto N., Mortensen A. Improvement of elevated temperature mechanical properties of Cu–Ni–Sn–Pb alloys // Materials Science and Engineering A 527. – 2010. – P. 4326-4333.
6. Mehmet Sirac Ozerdem, Sedat Kolukisa Artificial neural network approach to predict the mechanical properties of Cu–Sn–Pb–Zn–Ni cast alloys // Materials and Design, 30. – 2009. – P. 764–769.

### Рецензенты

Колубаев Александр Викторович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией физики упрочнения поверхности ИФПМ СО РАН, г. Томск.

Сизова Ольга Владимировна, д.т.н., профессор, в.н.с. ИФПМ СО РАН, г. Томск.