

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение выс-
шего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института)

Нанотехнологии, материаловедение и механика

(наименование кафедры)

22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Современные материалы и технологии их производства

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Влияние режимов термической обработки на микроструктуру и свойства деталей из бронзы БрАЖН 10-4-4, работающих в условиях износа

Обучающийся

Р.М. Гусейнов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к. ф-т.н., Л.И. Попова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2023

Аннотация

Выпускная квалификационная работа на тему “Влияние режимов термической обработки на микроструктуру и свойства деталей из бронзы БрАЖН 10-4-4, работающих в условиях трения износа”, посвящена достижению наиболее износостойкой микроструктуры вышеназванного сплава, с целью повышения сроков службы деталей из бронзы БрАЖН 10-4-4 в производственных условиях. Результаты исследований позволят выяснить как влияют различные режимы термической обработки на микроструктуру и механические свойства конструктивных элементов, изготавливаемых из бронзы БрАЖН 10-4-4.

Основная цель работы, задачи, последовательно решаемые для ее достижения, обоснование актуальности настоящих исследований представлены во введении.

Аналитический обзор содержит основные сведения об алюминиевых бронзах, о влияние легирующих элементов на свойства и фазовые превращения алюминиевых бронз, рекомендованные режимы термической обработки для упрочнения сплава и анализ основных факторов, влияющих на износостойкость бронзы.

Второй раздел работы посвящен методикам исследования, и оборудованию, которое использовалось в настоящей работе в процессе исследований и механических испытаний.

В третьем разделе представлены результаты экспериментов и анализ результатов.

В заключении отражены выполненные задачи и сформулированы выводы по работе.

Дипломная работа состоит из пояснительной записки, в том числе 24 рисунка, 5 таблиц, 24 источника.

Abstract

Final qualifying work on the topic “The influence of heat treatment modes on the microstructure and properties of parts made of bronze BrAlFeNi 10-4-4, operating under conditions of wear friction”, is devoted to achieving the most wear-resistant microstructure of the above-mentioned alloy, in order to increase the service life of parts made of bronze BrAlFeNi 10-4-4 under production conditions. The results of the research will make it possible to find out how various modes of heat treatment affect the microstructure and mechanical properties of structural elements made from bronze BrAlFeNi 10-4-4.

The main goal of the work, the tasks that are consistently solved to achieve it, the rationale for the relevance of these studies are presented in the introduction.

The analytical review contains basic information about aluminum bronzes, the influence of alloying elements on the properties and phase transformations of aluminum bronzes, recommended heat treatment modes for strengthening the alloy, and an analysis of the main factors affecting the wear resistance of bronze.

The second section of the work is devoted to research methods, and equipment that was used in this work in the process of research and mechanical testing.

The third section presents the experimental results and analysis of the results.

In conclusion, the completed tasks are reflected and conclusions on the work are formulated.

The thesis consists of an explanatory note, including 24 figures, 5 tables, 24 sources.

Содержание

Введение.....	5
1 Литературный обзор	7
1.1 Основные сведения об алюминиевых бронзах	7
1.2 Диаграмма состояния системы Cu – Al. Формирование равновесной микроструктуры	8
1.3 Влияние легирующих элементов на фазовый и структурный состав алюминиевых бронз. Никель и железо	12
1.3.1 Влияние никеля на фазовые превращения и микроструктуру сплавов системы «медь - алюминий».....	12
1.3.2 Влияние железа на фазовые превращения и микроструктуру сплавов системы «медь - алюминий».....	15
1.4 Термическая обработка алюминиевых бронз	17
1.5 Износостойкость	21
2 Материалы и методы экспериментальных исследований	25
2.1 Материал исследования.....	25
2.2 Постановка экспериментов	26
2.3 Методика определения химического состава	28
2.4 Методика подготовки образца.....	28
2.5 Методика термической обработки образцов.	29
2.6 Методика обработки поверхности образцов от грубых рисков и заусенец.....	30
2.7 Методика оценки твердости и износа.....	34
2.8 Методика запрессовки образцов	35
2.9 Методы исследования микроструктуры.....	36
3 Результаты экспериментов.....	39
3.1 Результаты образцов на сопротивление абразивному износу.....	39
3.2 Результаты измерения твердости образцов.....	41
3.3 Металлографический анализ	42
3.4 Анализ результатов исследований	49
Заключение	53
Список используемой литературы и используемых источников.....	55

Введение

Впервые находки сплавов из бронзы были найдены еще в третьем тысячелетии до нашей эры. Люди той эпохи смешивали медь с оловом, дабы получить материал со специальными характеристиками и внешним видом. В те времена из бронзы и ее сплавов изготавливалась посуда, статуэтки, украшения и орудия труда. Большую популярность данный сплав обрел во времена средневековья, благодаря тому, что из него изготавливали орудия труда и самообороны.

Бронза – сплав меди и олово, где олово выступает основным легирующим элементом, но в которой также могут присутствовать и другие легирующие элементы, такие как: алюминий, кремний, никель, железо и другие элементы. В зависимости от содержания легирующих элементов, сплав получает свое название.

БрАЖН 10-4-4, это медно-алюминиевый сплав, с дополнительными легирующими элементами в виде никеля и железа. Широко применяется во многих отраслях промышленности, за счет своих хороших механических и фрикционных свойств. Он используется в судостроении благодаря своей коррозионной стойкости к воде. Из данного сплава производятся червячные винты и втулки, которые контактируют с водной поверхностью. Также он может встречаться в авиационном строение, где из данного сплава делаются винты и лопасти самолетов, и в машиностроении. Из этого сплава изготавливаются детали, работающие на повышенных скоростях и при трении – седла, шестерни, подшипники скольжения, колодки и так далее.

На производстве АО “АвтоВАЗ”, данная бронза используется для производства направляющих колодок. Данная колодка работает в условиях сухого трения, когда между борштангой (которая сама проходит через колодку) и самой колодкой забивается абразивный шлам – мелкая алюминиевая стружка. Колодки по-разному изнашиваются, в зависимости от своих износостойких характеристик. Для этого, нами была поставлена цель

устранить данную проблемы следующим образом: укрепление микроструктуры и увеличение сопротивления к абразивному износу.

Цель работы: повысить износостойкость конструктивных элементов из сплава БрАЖН 10-4-4.

Перечень задач, необходимых для выполнения поставленной цели:

- определить факторы, которые оказывают влияние на сопротивление износу в условиях сухого трения;

- изучить специальную литературу, провести анализ упрочняющих режимов термической обработки БрАЖН10-4-4;

- провести термическую обработку образцов из бронзы БрАЖН10-4-4 по экспериментальным режимам;

- определить микроструктуру, твердость и износостойкость БрАЖН10-4-4 после различных режимов обработки, проанализировать полученные результаты;

- выдать рекомендации по режиму термической обработки, способствующей повышению сопротивлению износу, с целью дальнейшего применения в производстве.

1 Литературный обзор

1.1 Основные сведения об алюминиевых бронзах

Алюминиевые бронзы широко распространены в промышленной сфере благодаря сочетанию достаточной прочности, вязкости, высокой коррозионной стойкости и незначительной стоимости сплава. Кроме того, медь - основа бронз, обладает высокой проводимостью электрического тока и тепла. Алюминий, как основной легирующий элемент алюминиевых бронз, в свою очередь, добавляется для улучшения прочностных характеристик сплава. В зависимости от содержания легирующих элементов и их сочетания, можно добиться различного комплекса свойств бронзы, в том числе повышать прочность, износостойкость и стойкость к коррозии.

Используются они в авиационной промышленной сфере, в машиностроении, в электронике и других отраслях.

Самые распространенные виды алюминиевых бронз в промышленности являются БрАЖ9-4, БрАЖ9-4л и БрАЖН10-4-4, каждая из которых обладает рядом своих отличительных особенностей и свойств, применяющихся в различных областях промышленности.

За счет ряда преимуществ, связанных с механическими свойствами, как износостойкость и стойкость к коррозионной среде, данный тип бронз очень хорошо себя показывает в агрессивных средах в условиях высокой влажности. Также можно выделить высокие прочностные характеристики.

Эти преимущества алюминиевых бронз существенно влияют на их применение во многих отраслях промышленности. Например, в авиационной промышленности они применяются для производства лопастей и корпусов двигателей, рассчитанные выдерживать высокие температуры и нагрузки. В машиностроении, алюминиевые бронзы используются для производства подшипников, шестерен и других деталей, которые должны выдерживать высокие нагрузки и износ.

Хорошо применяются в электротехнической сфере, на пример: для производства контактов и соединительных деталей. В дополнение к этому, можно учесть, что наряду с нержавеющей сталью могут использоваться для производства медицинского оборудования, так как обладают высокой стойкостью к коррозии, но иногда цена не соответствует требованиям [1].

1.2 Диаграмма состояния системы Cu – Al. Формирование равновесной микроструктуры

Ключевым фактором, определяющим свойства и потенциальные применения алюминиевых бронз, является их микроструктура. Микроструктура медных сплавов формируется в процессе охлаждения и зависит от взаимодействия легирующих элементов и фазовых превращений, протекающих в системе. Диаграмма состояния отражает равновесную структуру сплава и позволяет отследить все фазовые превращения, протекающие при охлаждении. [2]. В процессе понижения температуры сплава, происходят различные фазовые и структурные изменения, приводящие к изменению номенклатуры, состава и количества фаз. Для того чтобы достичь равновесия, необходимо длительное время, и очень медленное охлаждение, которое иногда может достигать многих месяцев [3].

Основными легирующими элементами, которые добавляют в алюминиевые бронзы, для изменения их структуры, являются магний, медь, никель, кремний и никель [4].

В системе Cu-Al можно выделить четыре основные фазы: α , β , γ_2 и α_2 фазы.

На рисунке 1 представлена диаграмма состояния системы Cu-Al.

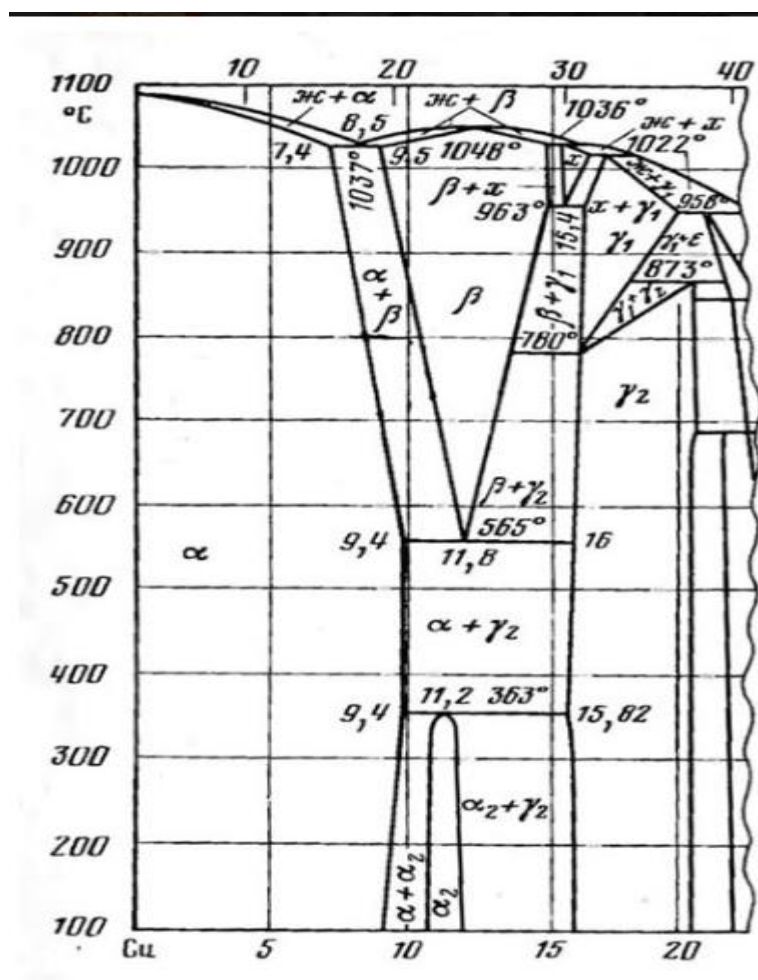


Рисунок 1 – Диаграмма состояния системы Cu-Al

Фаза – α – первичный твердый раствор замещения на основе меди, который охватывает широкую область составов (до 9 вес. % Al) и имеет гранецентрированную кубическую решетку. При понижении температуры растворимость алюминия увеличивается. Когда температура достигает значения в 1037°C растворимость алюминия равна 7.4 вес. %. [5].

Фаза – β – твердый раствор, образованный на интерметаллидной основе Cu_3Al , существующая при высоких температурах от 1036 до 1079°C и имеющая ОЦК решетку. В твердом состоянии β – твердый раствор претерпевает эвтектоидный распад при 565°C . При ускоренном понижении температуры ($2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$), фаза превращается в эвтектоид $\alpha+\gamma_2$ с образованием

крупнозернистой γ_2 фазы, выделяющийся в виде непрерывных цепей, придающих хрупкость сплаву [6]. Если температура ниже 550 градусов, фаза теряет свои свойства пластичности, стабильности и электропроводности.

Фаза – γ_2 является промежуточной, переменного состава со сложной кубической решеткой на основе Cu_9Al_4 . Фаза стабильно хорошо себя показывает на низких температурах, обладает высокими хрупкостью и твердостью, и меньшей электропроводимостью в сравнении с β – фазой.

Фаза α_2 – фаза образуется при температуре около 363 °С, в процессе протекающей перетектоидной реакции между двумя фазами α и γ_2 . Структура ее: ГЦК решетка, но от α – фазы отличается межатомными расстояниями в решетке. У сплава с 10% содержанием Al равновесная структура, соответствующая диаграмме состояния, - это $\alpha + \alpha_2$.

Стоит учесть, что в производственных условиях при отливке слитков и заготовок, обработке их давлением в горячем и холодном состоянии, скорость нагрева и охлаждения может значительно отличаться от тех, которые были указаны при построении равновесной диаграммы состояния. Из этого следует, что структуры литых и деформированных полуфабрикатов могут иметь немного различий от тех, что определены по равновесной диаграмме состояния, либо отличаются полностью. Таким образом, на микроструктуру сплава повлияет не только химический состав, но и процесс производства алюминиевых бронз и процесс термической обработки, если он предусмотрен. Именно термическая обработка позволяет изменять номенклатуру и количество структурных составляющих за счет различных режимов нагрева и охлаждения сплава.

Образование метастабильных фаз – это результат ускоренного охлаждения. При ускоренном охлаждении фазовые превращения из высокотемпературной области начинают усложняться и отличаться от тех, что были указаны выше, в соответствии с равновесной диаграммой состояния [7].

Такие метастабильные фазы также могут обладать различными свойствами. Могут иметь как ГЦК, так и ОЦК решетку.

На изотермической диаграмме распада высокотемпературной β фазы для сплава с 12% содержанием алюминия указаны С-образные кривые, при помощи которых можно определить микроструктуру сплава в метастабильном состоянии и, отчасти, спрогнозировать свойства. Указанные кривые на диаграмме указывают на кинетику фазовых превращений в зависимости от изотермической выдержки и скорости охлаждения при температурах ниже эвтектоидного превращения.

На рисунке 2 представлена Изотермическая диаграмма распада высокотемпературной β - фазы для сплава Cu+12,07% Al/

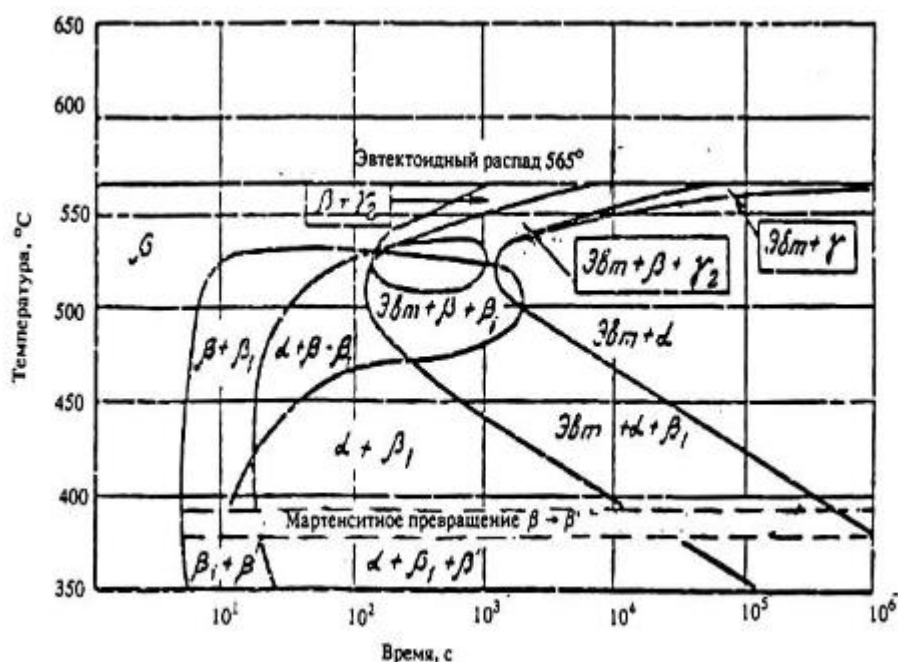


Рисунок 2 – Изотермическая диаграмма распада высокотемпературной β - фазы для сплава Cu+12,07% Al

Лабораторные испытания указывают на то, что распад β -фазы протекает через образование нескольких промежуточных фаз, характерной особенностью которых является некоторое пересыщение растворенных

элементов и потому, отнесены к фазам мартенситного типа. Основные из них- это β_1 , β_1' и β' - фазы.

Метастабильные фазы в сплавах системы «медь- алюминий»:

β_1 – фаза имеет ОЦК решетку, является упорядоченной;

β' – фаза с элементарной ГЦК решеткой, очень деформированная, так как в ней наблюдаются искажения и напряжения 3 рода;

β_1' – данная фаза с элементарной ромбической кристаллической решеткой, является упорядоченной

Фазы β_1 и β_1' характеризуются наибольшей степенью упорядочения.

Проанализировав изотермическую диаграмму распада, можно прийти к следующему заключению: в данной системе образуются достаточно многообразные и многофазные структуры в зависимости от степени переохлаждения. Если температура достигает отметки ниже 400°C , протекает мартенситное превращение, в результате которого начинают выделяться промежуточные фазы, способные сохраняться в микроструктуре сплава после того, как сплав полностью остынет.

Также стоит выделить, что содержание алюминия в промышленных сплавах колеблется в больших пределах, что зачастую оказывает влияние на стабильность механических свойств литых и деформированных полуфабрикатов из данного вида бронз. Необходимо контролировать химический состав, или независимо от колебаний химического состава, обеспечить стабильность свойств термической обработкой [8].

1.3 Влияние легирующих элементов на фазовый и структурный состав алюминиевых бронз. Никель и железо

1.3.1 Влияние никеля на фазовые превращения и микроструктуру сплавов системы «медь - алюминий»

Никель, на ряду с железом, являются хорошими легирующими элементами для медного сплава, так как каждый металл может придать

сплаву различного рода свойства, которые затребованы производством. В случае с никелем, он добавляется в алюминиевую бронзу для установления в ней двух основных свойств. Во-первых, улучшаются технологические свойства сплава и во-вторых, улучшаются его механические свойства. Стоит учесть, что улучшение свойств происходит, как и при обычных температурах, так и при высоких [9].

Неограниченно растворимый в твердом состоянии в меди, практически не растворяется в алюминии (при температуре 560°C растворимость 0,02%). Благодаря никелю, в микроструктуре происходит увеличение области α -фазы в системах Cu-Al и Cu-Al-Fe. В сплавах Cu-Al-Ni под влиянием никеля область α -фазы с понижением температуры значительно сдвигается в сторону медного угла, поэтому их можно подвергать дисперсионному твердению. При содержании никеля в 1%, мы можем наблюдать способность сплава к дисперсионному твердению. Никель повышает температуру эвтектоидного распада β фазы в $\alpha+\gamma_2$ до 615°C, задерживает превращение $\alpha+\gamma_2$ в β фазу при нагреве. Влияние никеля становится особенно заметным при его содержании более 1,5%. Если содержания никеля в сплаве составляет 2%, то β -фаза появляется при температуре 790°C, а при содержании 4% - при температуре 830°C [10].

Никель благоприятно воздействует на структуру эвтектоида $\alpha+\gamma_2$ и псевдоэвтектоида $\alpha+\beta$, заметно увеличивает стойкость фазовых превращений β -фазы, а при отливке и закалке способствует большему образованию количества метастабильной β' -фазы мартенситного типа. При этом α -фаза приобретает более округлую форму, структура становится более равномерной, повышается дисперсность эвтектоида.

Легирование никелем алюминиевых бронз заметно увеличивает их физико-механические свойства (теплопроводность, твердость, усталостную прочность), хладостойкость и антифрикционные характеристики, коррозионную и эрозионную стойкость в морской воде и слабых солянокислых растворах; жаростойкость и температуру рекристаллизации

без заметного ухудшения технологических характеристик. Если в сплавах содержится никель, заметно повышается модифицирующее действие железа.

На рисунке 3 представлена диаграмма состояния системы Cu-Ni.

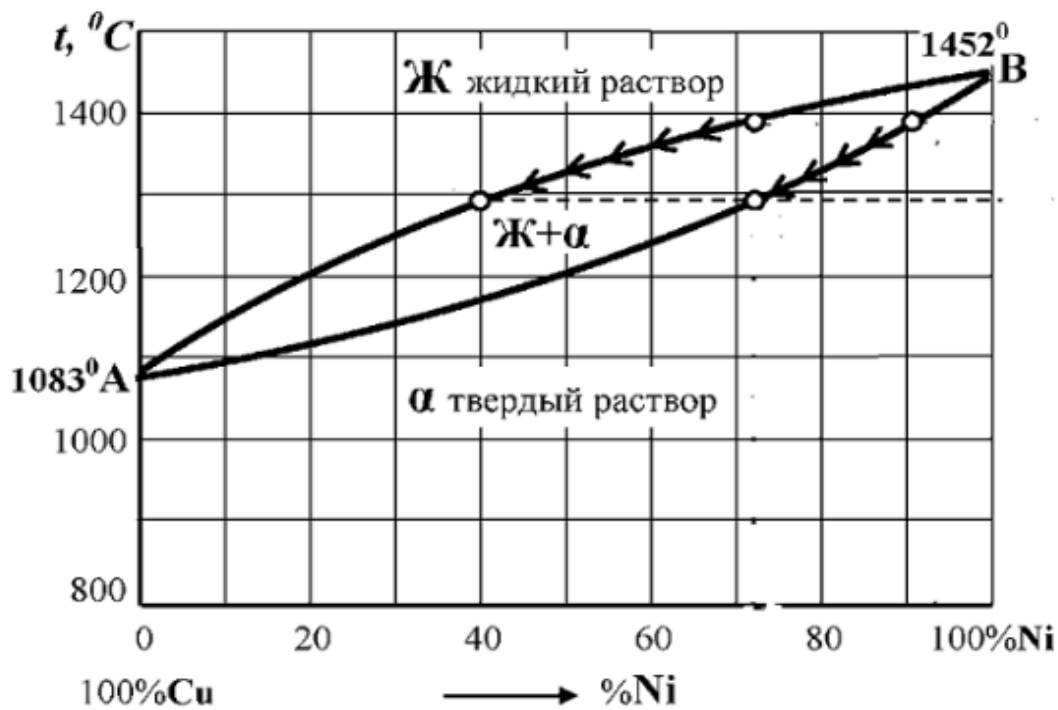


Рисунок 3 – Диаграмма состояния системы Cu-Ni

На данной диаграмме состояния указана линия АВ которая является ликвидусом, то есть линия при которой сплавы находящиеся выше нее будут находиться в жидкой фазе.

Также на диаграмме есть 2 линия АВ, но уже вогнутая и которая является солидусом. Это значит, что сплавы с любым химическим составом, лежащие ниже данной линии, являются твердым раствором.

Растворимость алюминия и никеля в меди существенно уменьшается при понижении температуры. В следствии этого, сплавы, которые одновременно легированы алюминием и никелем, существенно упрочняются при ТО, состоящей из закалки и старения, из-за выделения интерметаллидов Ni_3Al и NiAl [11].

1.3.2 Влияние железа на фазовые превращения и микроструктуру сплавов системы «медь - алюминий»

Железо в твердом состоянии мало растворимо в сплавах Cu-Al и образует с алюминием интерметаллическое соединение на основе Fe_3Al , которое способно выделяться, как отдельная самостоятельная фаза в виде мелкодисперсных частиц. Если в сплаве содержится около 1% Fe, образуется малое количество мелкодисперсных частиц, которые расположены вблизи эвтектоидной области ($\alpha + \gamma_2$) и обрамляют ее. Аналогично с увеличением содержания железа количество мелкодисперсных частиц будет возрастать. При содержании 4% Fe, мелкодисперсные частицы Fe_3Al образуются в двух областях: в области ($\alpha + \gamma_2$), и в области α . Мелкодисперсные частицы интерметаллического соединения Fe_3Al являются главным препятствием для роста зерен в алюминиевых бронзах при высоких температурах. Под влиянием данного легирующего элемента, который весомо способствует улучшению механических свойств, а также задержанию температуры рекристаллизации, в алюминиевых бронзах можно наблюдать исчезновение явление "самопроизвольного отжига", которое приводило к повышению хрупкости сплавов. Железо, измельчая структуру, останавливает образование в Cu-Al сплавах, содержащих 8,5-11,0% Al, крупнозернистой γ_2 фазы, выделяющейся в форме непрерывных цепей, обуславливающих хрупкость при медленном охлаждении сплава [12].

На рисунке 4 представлена диаграмма состояния системы Fe-Cu.

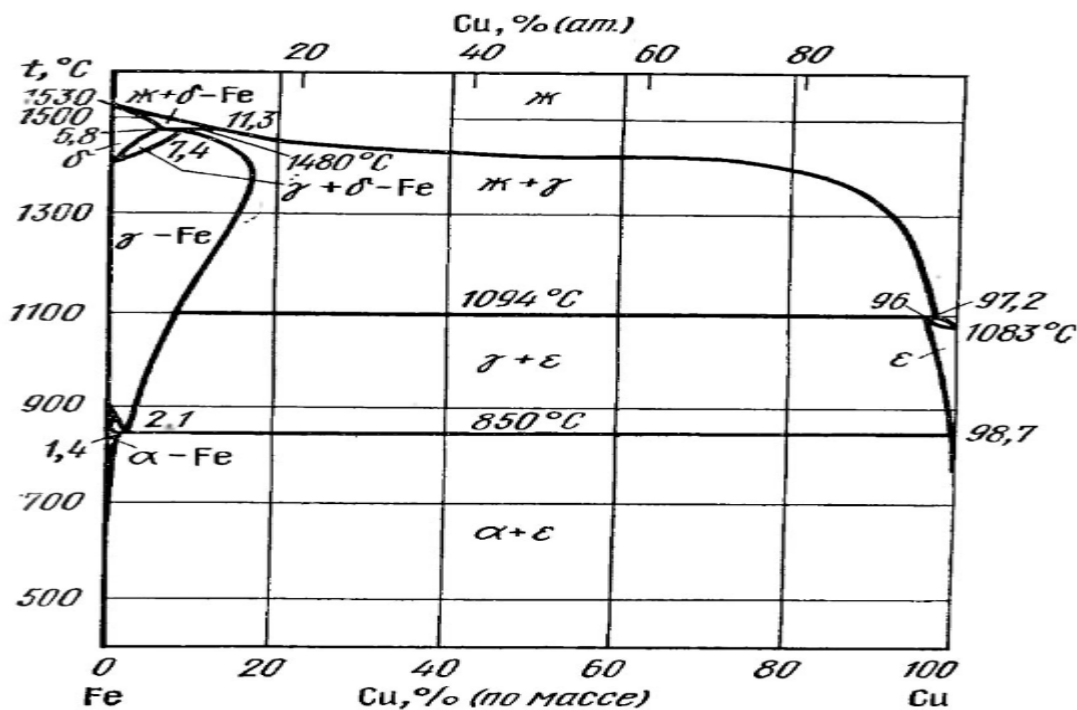


Рисунок 4 – Диаграмма состояния системы Fe-Cu

Сплав меди так же становится наиболее пластичным после нормализации с 600 – 700°C, которая уменьшает количество эвтектоида в структуре сплава. После закалки с 950°C сплав также отличается высокой пластичностью, так как их структура представлена в основном α и β фазами. Последующее старение проводится в температурном диапазоне 250-300°C и приводит к распаду β – фазы с образованием тонкодисперсной смеси. После старения прочность и твердость сплавов значительно увеличиваются, а пластичность уменьшается [13].

В присутствии железа свыше предела растворимости - 4%, вероятно образование к-фазы, которая выделяется в виде шаровидных включений. Согласно литературным данным, состав к-фазы: до 85% меди, 4,5- 5% железа и до 10% алюминия. Никель способствует образованию к-фазы. Образование в микроструктуре к-фазы сопровождается повышением износостойкости, но снижением сопротивляемости к электрохимической коррозии.

В сплавах с высоким содержанием железа появляется ϵ -фаза (FeAl_2), которая обычно сосуществует с α -фазой. Является нестабильной при высоких температурах и может привести к трещинам и разрушению материала. С увеличением концентрации железа в сплаве возрастает вероятность хрупкого, опасного с точки зрения надежности, разрушения.

1.4 Термическая обработка алюминиевых бронз

Термическая обработка является обязательным процессом обработки медного сплава, так как благодаря данной операции увеличиваются основные свойства сплава, применяемого в промышленности. Увеличивается прочность, жесткость сплава, коррозионная стойкость и повышается сопротивление к износу.

Как правило, процесс изготовления отливки из различных сплавов, как и медных, представляет собой определенный технологический порядок предпринимаемых действий.

Все начинается с литья, после которого, как правило, отливка подвергается горячему деформированию. При проведении горячего деформирования, степень пластической деформации составляет около 25-30%. Конечно однофазные бронзы можно подвергнуть и холодной обработке давлением, но при условии, что процентное содержание алюминия в сплаве будет меньше или равно 8%.

Изделие закаливается в охлаждающей среде, после того как оно было подвергнуто горячему формообразованию. Охлаждающей средой в данном случае может выступать вода. Данный процесс переводит структуру отливки в однофазное состояние.

Далее отливка вторично подвергается деформации, в этот раз при температуре выше рекристаллизационного порога, но ниже температуры первичной обработки давлением на 20-30 градусов Цельсия.

После окончательного формообразования изделий проводят двойную термическую обработку - закалку и отпуск.

Основными типами термической обработки алюминиевых бронз является закалка, отпуск и отжиг. Каждый из видов термической обработки применяется с целью получения определенных свойств или изменения микроструктуры сплава, за счет происходящих реакций во время процесса. В промышленном формате, зачастую встречается следующий режим термической обработки: первым этапом идет закалка при температуре от 750 до 950 градусов с последующим охлаждением в воде; после закалки образец подвергается отпуску при температуре от 250 до 600 градусов с последующей выдержкой на воздухе.

- Отжиг алюминиевых бронз представляет собой нагрев до высокой температуры при последующим медленном охлаждении. Данный вид термической обработки используется для улучшений механических и коррозионных свойств изделий из БрАЖН 10-4-4.

Температура отжига варьируется в пределах 600-800 градусов. После нагрева до определенной температуры, сплав держится при такой температуре в течении определенного времени (обычно несколько часов), для получения необходимой микроструктуры и свойств у сплава. После нагрева, начинается процесс охлаждения сплава. Он представляет собой охлаждение в специальной печи, в которой проходит медленное, но равномерное охлаждение сплава. Данный процесс позволяет нам получить желаемые свойства и микроструктуру.

Данный режим достаточно прост, что позволяет легко контролировать процесс отжига. Детали после данной обработки часто используются в авиационной промышленности и судостроение.

- Следующим режимом ТО является закалка. Преимуществами данного режима является повышение механических свойств включая прочность, твердость и сопротивление к износу. Материал нагревается в пределах 800-900⁰С с последующим охлаждением в воду или масло. Это способствует

образованию мелкозернистой структуры материала. Особенностью данного вида термической обработки является то, что он проводится без выдержки внутри печи, что позволяет экономить время и энергию.

Температура закалки будет зависеть от химического состава сплава. На практике используется следующая эмпирическая формула:

$$T_3 = 1990^{\circ}\text{C} - 1000 * \% \text{Al}(\text{вес.}) [14].$$

Данная формула обозначает, что при увеличении процентного содержания алюминия внутри сплава, температуре нагрева уменьшается.

Следующим режимом термической обработки алюминиевых бронз после закалки с последующим охлаждением, является отпуск.

- Отпуск применяется для изменения микроструктуры сплава за счет распада неравновесных фаз, полученных при закалке и формирования определенных конечных свойств сплава. Данный режим термической обработки является необходимым после закалки, поскольку благодаря отпуску улучшаются механические, фрикционные и коррозионные свойства у сплава.

Выбор температурного интервала отпуска для сплава во многом зависит от того, какие свойства и какая микроструктура предпочтительна для условий эксплуатации конструкций.

Например, отпуск при температурах от 150 до 300 градусов увеличивает у сплава его прочность и устойчивость сплава к усталости при растяжении. Отпуск при температурах от 300 до 550 градусов увеличивает у сплава прочность при сжатии и жаростойкость.

Если отпуск был проведен правильно, то это может сказаться не только на механических свойства сплава. Благодаря правильно подобранной температуры отпуска позволяет обезопасить сплав от возможных деформаций, трещин или различных повреждений на поверхности, которые могут возникнуть в последствии эксплуатации деталей и изделий из бронзы БрАЖН 10-4-4 [15].

Известно, что согласно ГОСТ бронза одной марки имеет достаточно широкий допустимый концентрационный интервал содержания легирующих элементов, что является одной из причин нестабильности механических свойств изделий. Так для стабилизации прочностных и пластических свойств в странах Европы и США нормирующие документы предполагают допустимые интервалы по содержанию легирующих элементов в бронзах уже в 1,5-2 раза меньше.

Также высокое процентное содержание легирующих элементов, таких как железо и никель, может привести к различным изменениям микроструктуры. Учитывая все вышесказанное, становится понятно, почему затруднен выбор параметров термической обработки сплава.

Согласно справочным материалам и литературным данным, закалка и отпуск являются основными режимами термической обработки сплава бронзы БрАЖН 10-4-4 применяемого в машиностроении. Предлагаемые температурные режимы закалки варьируются в пределах 900-950 градусов, при котором получается однофазная система, представляющая собой бета фазу, с последующим упрочнением в холодной воде, а для отпуска температурный интервал в пределах от 250 до 600 градусов [16].

Понижению температуры под закалку приводит образование двухфазной основы в микроструктуре: $\alpha+\beta$, но в связи с отличиями химического состава требуется правильно подобрать температуру нагрева для каждой отдельной партии. При одной температуре нагрева всех партии будет формироваться различное количество образующейся β -фазы в каждой отдельной партии изделий и выявляться отсутствие стабильности свойств. Температура отпуска после такой закалки допускается в интервале от 350 до 420 °С

Все вышеуказанные режимы, кроме отжига, предполагают эффект упрочнения, но исследований о влиянии данных режимов ТО на износостойкость бронзы практически нет [17].

На ОАО «АвтоВАЗ» уже в течении нескольких лет занимаются проблемой повышения износостойкости и стабильности свойств бронзовых изделий. Так, исследования о влиянии ТО на структуру и механические свойства с БрАЖ9-4, показали, что присутствие мелких зерен γ_2 – фазы способствует повышению твердости сплава и отпуск алюминиевых бронз вблизи температуры эвтектоидного распада β -фазы может способствовать повышению износостойкости [18].

1.5 Износостойкость

В современной промышленной сфере такой фактор как износостойкость играет важную роль. Это является одним из главных требований к деталям, которые работают в жестких средах и подвергаются регулярным нагрузкам. Поэтому данный фактор является основополагающим при выборе деталей, ведь в зависимости от их качества, будет зависеть время работы, на которые они должны быть рассчитаны.

Износом называется процесс разрушения материалов с поверхности под действием различных сил трения. В зависимости от изменения его линейных размеров и массы с течением времени, определяют скорость изнашивания и ресурс детали [19].

То, как деталь будет сопротивляться износу, будет зависеть от следующих факторов:

- свойств материала,
- от внешних условий
- наличия смазочных материалов.

Основными видами износа можно выделить следующие:

- Абразивный
- Адгезионный
- Окислительный

— Усталостный

В нашем случае будет рассматриваться сопротивление к абразивному износу.

Таким износом называется процесс, при котором поверхность материала становится источником трения, что приводит к ее повреждению. Данное явление происходит при взаимодействии двух поверхностей. В следствии контакта одна их поверхностей начинает сдавливать, тереть и царапать другую поверхность. Другим словами – изнашивать.

Наибольшему износу подвержены материалы, которые находятся под постоянным воздействием абразивной среды. Дабы увеличить срок службы детали и предотвратить ее износ, применяются следующие методы решения проблемы:

- Применение, специальных покрытий на поверхность материала
- Использование материалов, которые обладают более высокими свойствами стойкости к износу
- Изменение механических свойств материала за счет проведения термической обработки

Первые два пункта могут быть не целесообразны из-за своей дороговизны. Третий пункт позволяет с минимальными затратами прибегнуть к изменению механических свойств материала, за счет проведения правильно подобранных режимов термической обработки [20].

На рисунке указаны результаты уже проведенного эксперимента по увеличению износостойкости деталей из сплава БрАЖ-9-4 за счет проведения различных режимов термической обработки.

На рисунке 5 представлен весовой износ образцов после термической обработки для сплава БрАЖ 9-4.

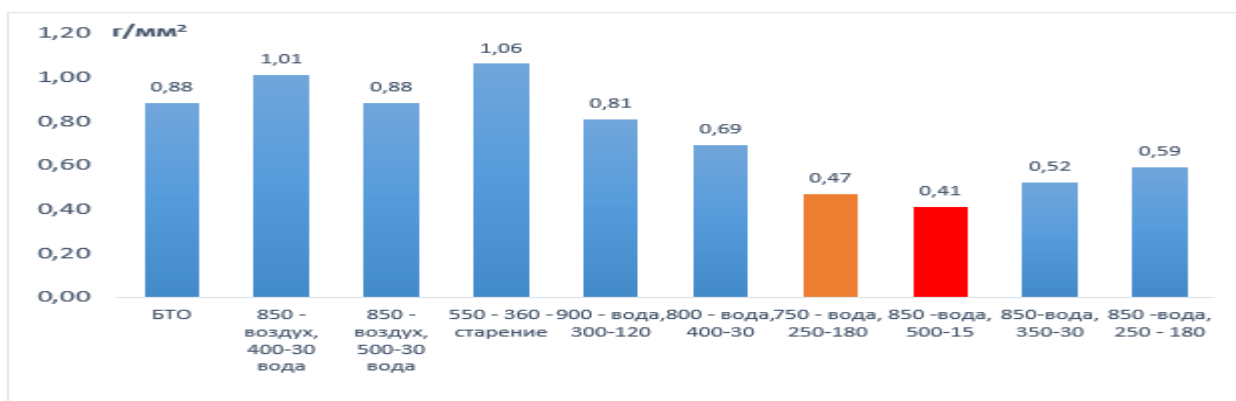


Рисунок 5 – Весовой износ образцов после термической обработки для сплава БрАЖ 9-4 [21].

По результатам проведенных испытаний, образцы, имеющие следующие температурные режимы термической обработки:

— 750°С охлаждение в воду, отпуск при 250° С в течение 180° С остывание на воздухе

— 850°С охлаждение в воду, отпуск при 500° С в течение 15 мин, остывание на воздухе

Имеют лучшие результаты по износу. Из этого следует, что температура закалки в пределах 750-850 градусов, с последующим отпуском при температуре эвтектоидных и перетектоидных превращений является лучшими режимами термической обработки для сплавов для того чтобы увеличить их сопротивление к износу [22].

Выводы по разделу:

— Повышение износостойкости бронз путем термической обработки является наиболее универсальным и экономичным способом при производстве изделий.

— За счет широкого спектра химического состава сплава БрАЖН 10-4-4 существуют трудности в подборе режимов ТО для получения необходимых свойств бронзы.

— Литературный обзор показал, что влияние параметров термической обработки на износостойкость изделий из алюминиевых бронз изучено недостаточно. Поэтому исследования по разработке технологического процесса упрочняющей термической обработки БрАЖН 10-4-4 являются актуальными и представляют научный интерес.

2 Материалы и методы экспериментальных исследований

2.1 Материал исследования

Материалом исследования является алюминиевая бронза БрАЖН 10-4-4, которая широко применяется в многих отраслях промышленности.

Химический состав бронзы согласно ГОСТ 18175-78 приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав бронзы согласно ГОСТ 18175-78

Fe	Si	Mn	Ni	P	Al	Cu	Pb	Zn	Sn	примесей
3,5-5,5	До 0,1	До 0,3	3,5-5,5	До 0,01	9,5-11	77,4-83,5	До 0,02	До 0,3	До 0,1	Всего 0,6

На рисунке 6 представлены образцы, которые использовались для исследований.



Рисунок 6 – Образцы, которые использовались для исследований

Исследуемый сплав был проверен на соответствие химического состава по ГОСТу. Химический состав определен методом спектрального анализа и приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав БрАЖН 10-4-4

Cu	Al	Fe	Mn	Ni	Si
81,31	9,379	4,443	0,325	4,242	0,049

2.2 Постановка экспериментов

В предыдущей главе проведен анализ литературных данных о термической обработке и ее влиянии на механические свойства алюминиевых бронз. Анализ данных указывает на отсутствие информации связанной с износостойкостью данного типа бронз.

Опыт предыдущих исследований и литературные данные позволили нам выбрать и назначить режимы ТО, которые по-нашему мнению позволят повысить износостойкость бронзы БрАЖН 10-4-4, а также режимы, рекомендованные в литературе, необходимые для сравнительного анализа структуры и свойств.

Для удобства эксперимента, 3 исследуемых образца были поделены на 8 равных маленьких образцов, с целью подбора для каждого образца определенного режима термической обработки. Высота образцов составляла 20 мм, а ширина 5.45 мм.

Ниже в таблице будут указаны какие режимы для какого образца были определены.

Таблица 3 – Экспериментально выбранные режимы термической обработки образцов

№	T нагрева под закалку (выд 30 мин)	Среда охлаждения	T отпуска	Время выдержки
0-нулевой				
1.1	950	Вода	250	2 часа
1.2	950	Вода	300	2 часа
1.3	950	Вода	350	2 часа
1.4	900	Вода	350	1 час
1.5	900	Вода	400	1 час
1.6	900	Вода	450	1 час
1.7	900	Вода	650	1,5 часа
2.1	850	Вода	400	1 час
2.2	850	Вода	500	0,5 часа
2.3	850	Вода	550	0,25 часа
2.4	800	Вода	400	1 час
2.5	800	Вода	350	2 часа
2.6	750	Воздух	-	-
2.7	700	Воздух	-	-
3.1	750	Вода	400	2 часа

Для испытания были подготовлены образцы имеющие следующие размеры; высота образцов составляла 20 мм, а диаметр 5.45мм.

После проведенных термических обработок, образцы использовались для дальнейших исследований микроструктуры, расчета твердости и сопротивления на износ.

2.3 Методика определения химического состава

На рисунке 8 представлен Оптический эмиссионный спектрометр OBLF QSN -750 – II.



Рисунок 8 – Оптический эмиссионный спектрометр OBLF QSN -750 – II

При помощи оптического эмиссионного спектрометра, указанного на рисунке 3, был получен химический состав изучаемой алюминиевой бронзы.

Прежде чем использовать спектрометр, необходимы контрольные образцы, для его калибровки.

2.4 Методика подготовки образца

Первым этапом работы было деление образцов на 8 одинаковых частей высотой 20мм и шириною 5.45мм. Для удобства резания использовался специальный высокоточный отрезной станок МЕСАТОМЕ 210 указанный на рисунке 3. Данный станок имеет 3 режима резки:

— Полуавтоматический: ручная резка может быть выполнена с помощью джойстика для управления столом (без усилий для оператора).

— Автоматический: автоматическая резка может быть выполнена путем выбора скорости вращения диска и скорости перемещения стола. Возможность импульсного режима резки.

— Программируемый: автоматический рез может быть выполнен с использованием предварительно выбранных параметров.

На рисунке 9 представлен Отрезной станок МЕСАТОМЕ 210



Рисунок 9 – Отрезной станок МЕСАТОМЕ 210

В нашем случае применялся 1 режим резки. На образце отмечались границы, по которым станок должен был резать. Образец внутри станка фиксировался специальными зажимами он и с помощью джойстика управления приводили станок в действие для резки образцов.

2.5 Методика термической обработки образцов.

Для проведения испытаний с выбором различных режимов ТО, использовалась специальная муфельная печь «Термокерамика» (рисунок 10). Встроенный терморегулятор сбоку печи позволяет данной работать по любой из интегрированных программ: плавный набор температуры, фиксация температурного режима на выбранное время, осуществление плавного остывания образца.



Рисунок 10 – Печь «Термокерамика»

После проведенной закалки образцы отправлялись в воду, затем снова в печь и уже после второго режима термической обработки, образцы остыли на воздухе и использовались для дальнейших операций по их изучению.

2.6 Методика обработки поверхности образцов от грубых рисков и заусенец

После резки образцов и проведенных режимов термической обработки, их грани и поверхности подвергались тщательной шлифовки. Во-первых, удалялись заусенцы, для более удобного дальнейшего использования, во-вторых, удалялись грубые риски с поверхности при помощи шкурок имеющих разную зернистость. Для проведения работ по шлифовке образцов были использованы шлифовальные станки MINITECH 300 DP1 (рисунок 11) [23].

Данной станок активно применяется в металлографии за счет простоты и удобства использования.



Рисунок 11 – Шлифовальный станок MINITECH 300 DP1

Суть его работы проста: шкурка определенной зернистости кладется на диск станка, образец фиксируется на шкурке, которая убирает заусенцы и риски с поверхности материала с подачей холодной воды. Зернистость шкурок варьируется от P400 до P2000.

Таблица 4 – Технические характеристики шлифовального станка MINITECH 300 DP1

Кол-во рабочих дисков	2
Кол-во двигателей	1
Диаметр рабочего диска	250/300мм
Скорость вращения диска	20 – 700 об/мин
Мощность двигателя S1	900 Вт
Мощность двигателя S3	1 500 Вт
Вращение диска: по и против часовой стрелки	●
Дисплей	Цветной сенсорный TFT
Таймер	1 – 999 с

Композитный ударо-коррозионностойкий корпус	•
Быстросъемная чаша	•
Отображение силы прижатия образца	•
Многоструйная подача воды	•
Габариты (ШхГхВ)	1100 x 810 x 330 мм
Вес	60 кг
Энергопотребление	230 В, одна фаза 50 Гц
Соответствие	СЕ

После того, как образец был отшлифован, он подвергается полировке на полировочной машинке (рисунок 12). На специальном диске полировочной машинки устанавливается полировочное сукно, которое заранее было обработано алмазной пастой. Далее образец ставится перпендикулярно направлению движения сукна и производится полировка поверхности в течении 30 секунд; если поверхность недостаточно отполировалась, полировка продолжается с целью получения блестящей поверхности. Чтобы образец не перегревался во время полировки и его поверхность не деформировалась, применяется этиловый спирт, который охлаждает поверхность образца и сукна.



Рисунок 12 – Полировочная машинка

После проведенных процедур и получения удовлетворяющего результата, а именно: получения ровной поверхности с отсутствием рисков и заусенцев, переходим к следующему этапу.

2.7 Методика оценки твердости и износа

Для оценки твердости образцов использовали стандартизированный метод Виккерса (рисунок 13). Для чего был выбран ГОСТ Р ИСО 6507 – 1 – 2007, так как данный ГОСТ является наиболее актуальным документом на сегодняшний день и, в отличие от ГОСТ 2999-75, описывает измерения с нагрузкой в более широком диапазоне, а также предусматривает оценку неопределенности результатов измерений.



Рисунок 13 – Твердомер Виккерса

Механические испытания состояли в измерении твердости по Виккерсу при нагрузке в 30 кг. Продолжительность выдержки под нагрузкой для цветных металлов 30 ± 2 с в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507 – 1 – 2007.

Твердость определяли делением приложенной нагрузки на квадрат диагонали отпечатка по прилагаемым к оборудованию таблицам.

На твердомере есть рычаги, которые приводят в действие твердомер и оставляет отпечаток на поверхности образца. Далее мы подгоняем размер отпечатка под границы, которые видны при помощи специального окуляра на твердомере, и списываем получившееся значение. Результат сравниваем с табличным, который идет в комплекте с прибором и записываем в результаты измерений. Для каждого образца производилось по 3 измерения.

Перевод измеренных значений в числа твердости осуществляется по таблицам, входящим в комплектацию прибора. Тестовые нагрузки от 10 до 1000 г. Пределы допускаемой абсолютной погрешности в зависимости от твердости: от 50 до 300 HV – от ± 3 до ± 15 . Питание в розетку 220/240 В.

2.8 Методика запрессовки образцов

В специальном прессе для запрессовки, образцы запрессовывались для дальнейшего изучения их микроструктуры. В предназначенный для образцов цилиндр кладутся объекты, которые будут запрессовываться и засыпаются они сверху заливным порошком в гранулах. Далее крышка цилиндра плотно закрывается и начинается изготовление пресса. На самой установке есть температурный датчик, на котором указана температура заготовки. Как только температура становится ниже или равна 50 градусам, то заливка готова и предстоит к дальнейшему исследованию. В основном, на изготовление заливки уходит около 15-20 минут [24].

На рисунке указан пневмопресс (рисунок 14), который использовался для изготовления отливок, непосредственно перед изучением микроструктуры.



Рисунок 14 – Пневмопресс

2.9 Методы исследования микроструктуры

Для оценки микроструктуры сплава, использовался ГОСТ 21073.1-75 «Металлы цветные. Определение величины зерна. Общие требования». Для подсчёта соотношения фаз использовали метод количественного анализа на основе ГОСТ 8233-56 – соотношение перлита и феррита в структуре стали. Эта методика допустима к использованию, поскольку при анализе изображений, подсчет фаз выполняется благодаря делению на «темные» и «светлые» пятна.

Нашей задачей при изучении микроструктуры сплава, является видение четко выделенных альфа и бета фаз. Для того чтобы их увидеть, образцы подвергались травлению раствором, состоящим из 16,7 г $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 25 мл соляной кислоты и 100 мл дистиллированной воды, травление проводилось в

течении 2 – 5 с в соответствии с методическими указаниями. При помощи данной операции, нужные нам фазы альфа и бета дифференцировались и делились на светлые и темные пятна.

Съемка производилась в автоматическом режиме с применением комплекса SIAMS 800, который работает в паре с инвертированным оптическим микроскопом OLYMPUS GX-51.

К преимуществам данного комплекса можно отнести следующие параметры.

Наблюдения в 4-х режимах — светлого и темного поля (BF и DF), дифференциально-интерференционного контраста (ДИК) Номарского (DIC) и в простом поляризованном свете.

Широкий выбор оптических элементов, револьверные головки (в том числе моторизованные) на 5 и 6 объективов. Объективы UIS оптики с увеличением от 1.25x до 150x.

Допускается установка промежуточного модуля с двукратным увеличением.

Предусмотрено использование фильтров различных типов.

Встроенный порт позволяет подключать одновременно до 3-х камер, на пример камеру высокого разрешения UC30 для цифровой съемки или классическую 35 мм камеру.

Основание Т-образной формы, ножки-опоры с устройствами поглощения вибрации, блок питания в единой конструкции с прибором.

Возможность установки разных источников света — галогенной лампы мощностью 100 Вт, металлгаллидной 50Вт, 75Вт-ной ксеноновой или 100Вт ртутной ламп.

Быстрая смена домиков ламп в зависимости от необходимости измерений

На рисунке 15 представлен программный комплекс с интегрированным оптическим микроскопом.

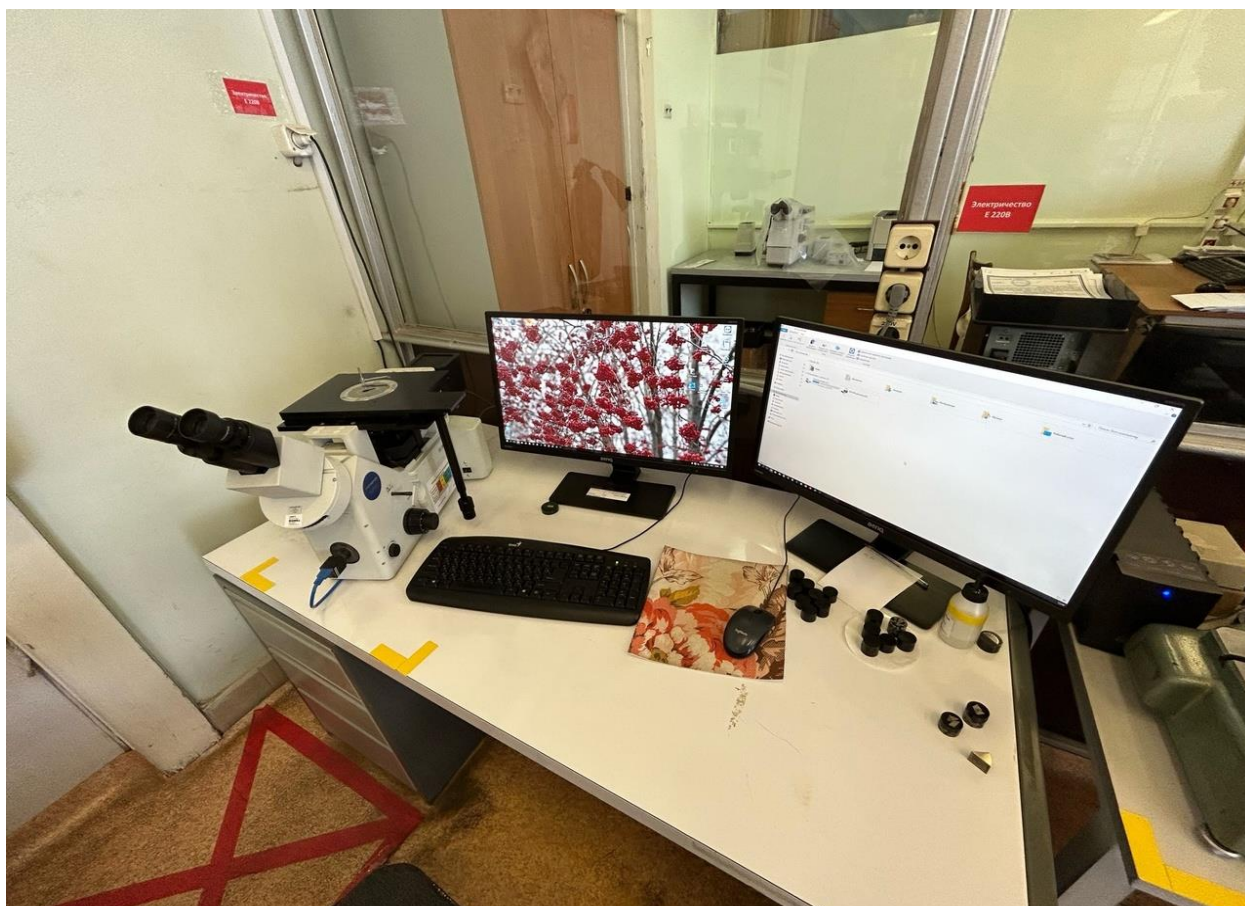


Рисунок 15 – Программный комплекс с интегрированным оптическим микроскопом

При изучении микроструктуры, применялся специализированный режим, при котором проводился анализ объекта на движущейся платформе микроскопе с динамическим наложением маски.

Выводы:

Подобрано современное оборудование для выполнения экспериментов, связанных с изучением влияния режимов ТО на микроструктуру и свойства медного сплава бронзы БрАЖН 10-4-4.

3 Результаты экспериментов

3.1 Результаты образцов на сопротивление абразивному износу

В ходе работы были проведены все необходимые испытания и замеры. Описание результатов экспериментальных исследований и анализ результатов представлены в данной главе.

После проведения различных режимов термической обработки образцы были испытаны на твердость и износостойкость. Результаты измерений приведены ниже (рисунок 16).

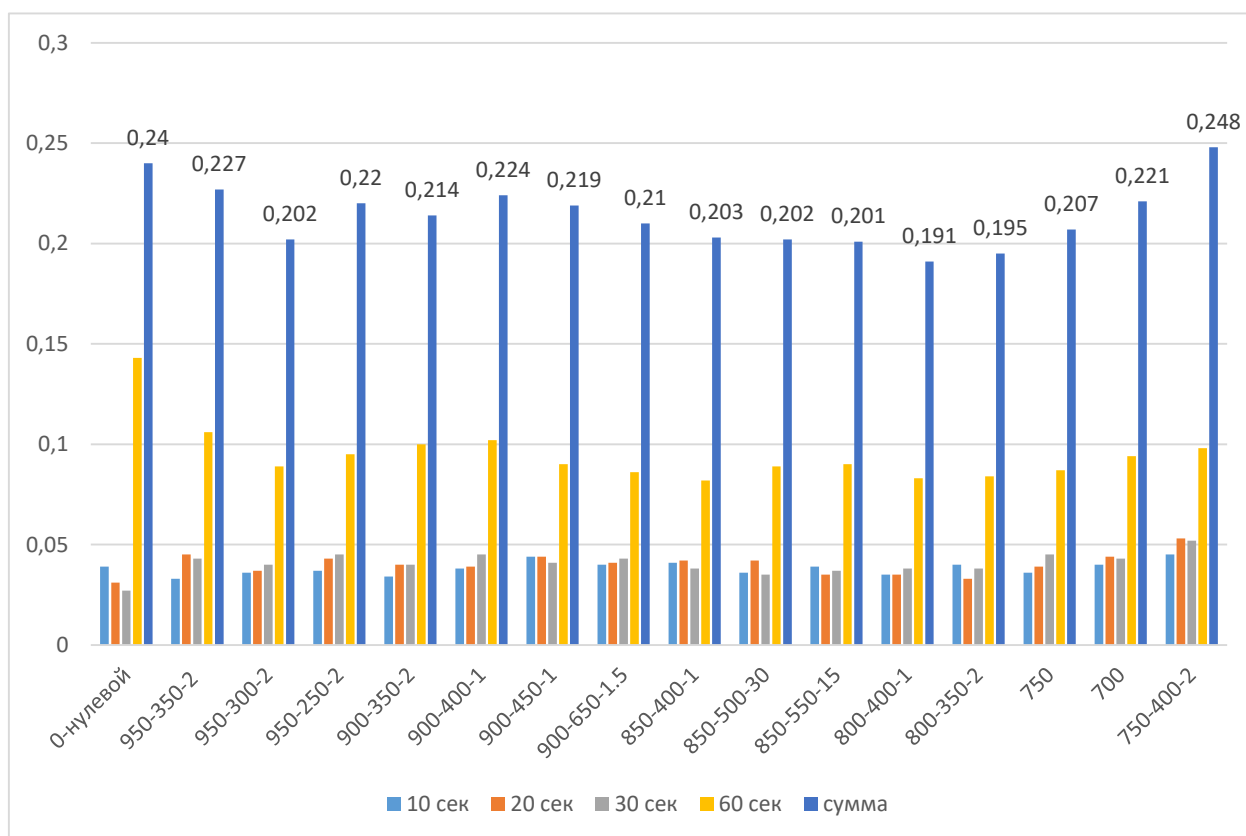


Рисунок 16 – Весовой износ образцов после различных режимов термической обработки

По результатам испытаний на износостойкость, можно утверждать, что на конечном этапе износа значение превышает значение износа на начальном этапе примерно в 2 раза. В нулевом образце, который не подвергался

термической обработке, это отношение равно 4. Данный факт свидетельствует о том, что термическая обработка положительно влияет на износостойкость материала, позволяя увеличить срок его службы.

Однако результаты на износ у образцов получились разные. Наша цель выбрать наиболее оптимальный режим термической обработки, позволяющий получить наиболее лучший результат на износ. Для этого были отобраны 3 образца обладающих наилучшем результатом по износостойкости, и 3 образца обладающих наихудшей износостойкостью для сравнительного анализа их микроструктур, с целью выяснить как различные режимы влияют на сопротивление к абразивному износу.

Образцы с наилучшей износостойкостью: Образцы № 2.3; 2.4 и 2.5

Образцы с наихудшей износостойкостью: Образцы № 1.1; 1.5 и 3.1

Образец № 2.3 с температурой нагрева под закалку 850 градусов в течении 30 минут и температурой отпуска 550 градусов в течении 1 часа

Анализ результатов показал, что потеря массы образцов не является однозначной функцией времени износа.

Так для образца без ТО потеря веса по сумме трех первых испытаний составила 0,097 гр, а за 30 секунд последних испытаний — 0,143 гр, что в 1,5 (полтора) раза больше предыдущего значения.

Для образца 2.5. потеря веса по сумме трех первых испытаний составила 0,108 гр, а за 30 секунд последних испытаний — 0,083 гр. Отношение данных значений составило всего 1,2.

Данный факт уже свидетельствует о том, что термическая обработка положительно влияет на износостойкость материала.

3.2 Результаты измерения твердости образцов

После испытаний на абразивный износ, у каждого образца измерялась его твердость на твердомере Виккерса (рисунок 17).

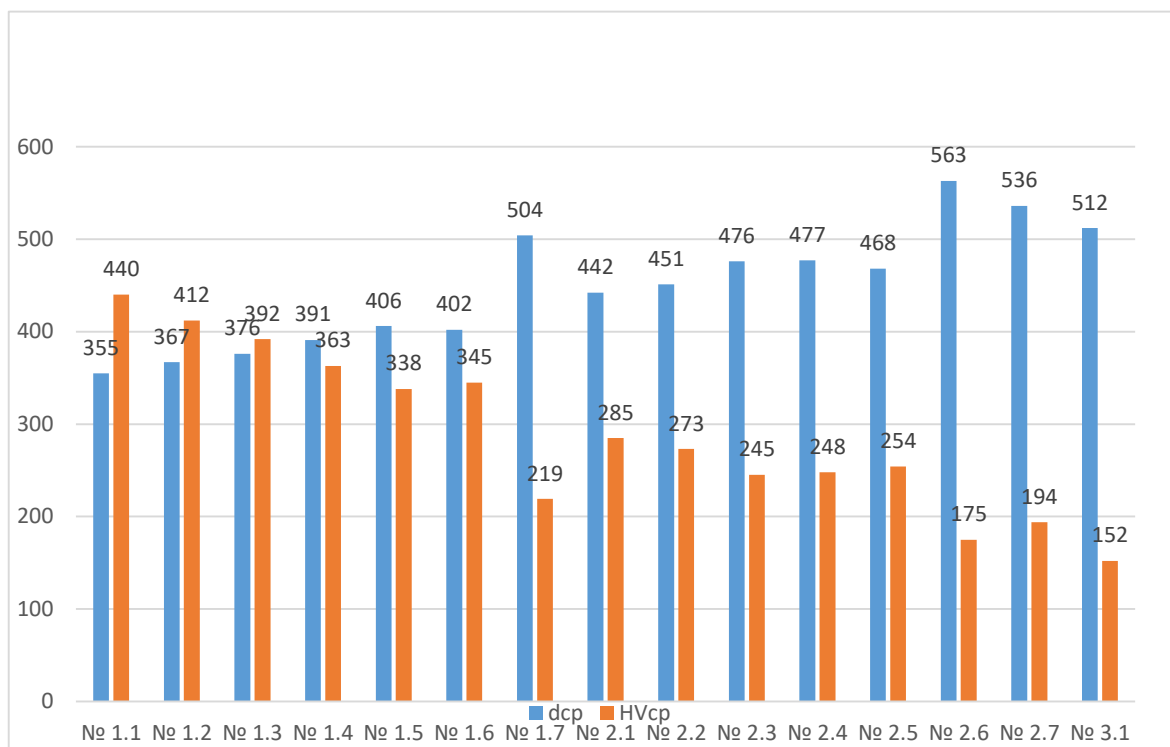


Рисунок 17 – Твердость образцов из БрАЖН 10-4-4, подвергнутых различным режимам термической обработки

dcp – это значение среднего отпечатка на поверхности изучаемого образца

HVcp – это значение твердости изучаемого образца

Из полученных данных, указанных на рисунке 12, сложно сказать, что твердость образца оказывает существенное влияние на их износ.

У образцов с лучшим показателем износостойкости, твердость варьируется примерно в одинаковых значениях и имеет среднее значение по диаграмме (в пределах 240-260 HV), а у образцов с наихудшим значением износостойкости, твердость сильно различается, причем у некоторых образцов в 2 раза.

Также по результатам эксперимента, можно сделать вывод о том, что с понижением температуры нагрева под закалку, значение твердости сплава уменьшается.

Однако, как показано в предыдущих исследованиях, высокая твердость сплава не обязательно обеспечивает высокое сопротивление абразивному износу.

Наиболее важным фактором, обеспечивающим высокое сопротивление изнашиванию, является микроструктура сплава, формирующаяся в процессе термической обработки.

3.3 Металлографический анализ

На рисунке, сделанным на микроскопе с 500 кратным увеличением, показана микроструктура детали из алюминиевой бронзы марки БрАЖН 10-4-4 не обработанного термически (рисунок 18).

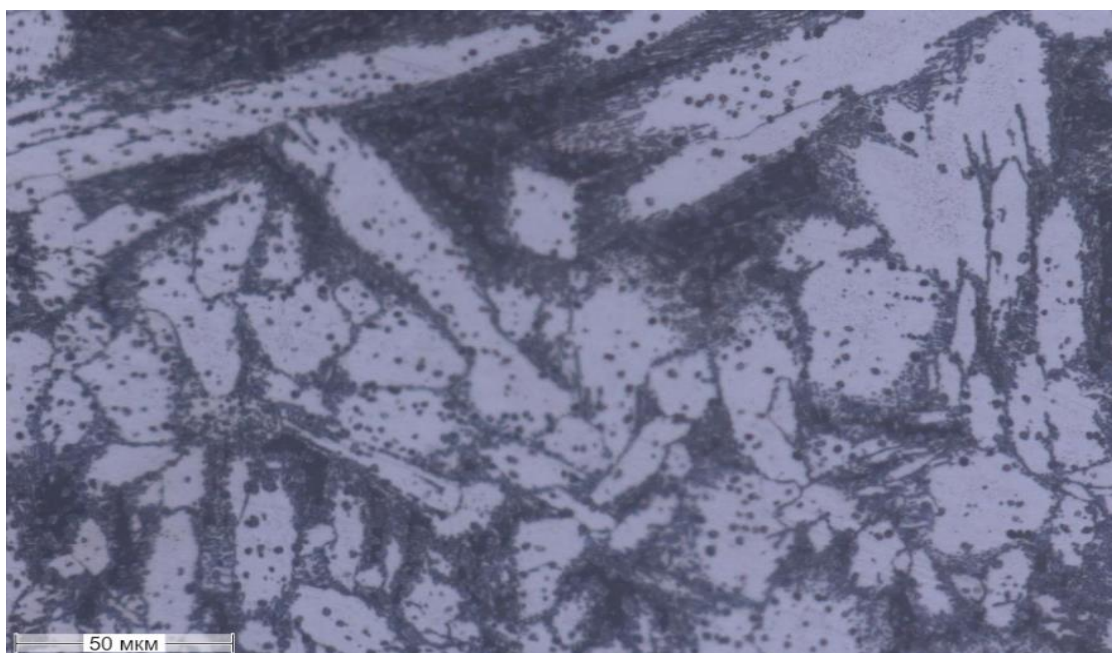


Рисунок 18 – Микроструктура БрАЖН 10-4-4 без термообработки

Четко выделяется две основные фазовые составляющие: это α -фаза – твердый раствор на базе ГЦК решетки меди и β -фаза – твердый раствор на

интерметаллидной основе Cu_3Al . В структуре присутствует и γ_2 -упрочняющая фаза, в основном в зернах α -раствора.

Необходимо выяснить какие структурные составляющие и в каком количестве обеспечивают максимальную износостойкость бронзы. Для этого проведем сравнительный анализ микроструктуры образцов с наилучшим сопротивлением износу и образцов с наихудшим сопротивлением износу.

Лучшими образцами, как мы ранее выяснили, стали образцы 2.3; 2.4 и 2.5. Худшими образцы 1.1, 1.5 и 3.1.

На рисунке 19 показана микроструктура образца под номером 2.3, закаленного с температуры 850 градусов и отпущенного при температуре немного ниже эвтектоидного превращения (550°C) 15 минут. Микроструктура образца состоит из достаточно большого количества темно травящейся бета-фазы и альфа – раствора (светлые зерна) с вкраплениями вторичной гамма фазы, образующейся при эвтектоидном распаде бета фазы. Количество вторичной гамма фазы незначительно (рисунок 19).

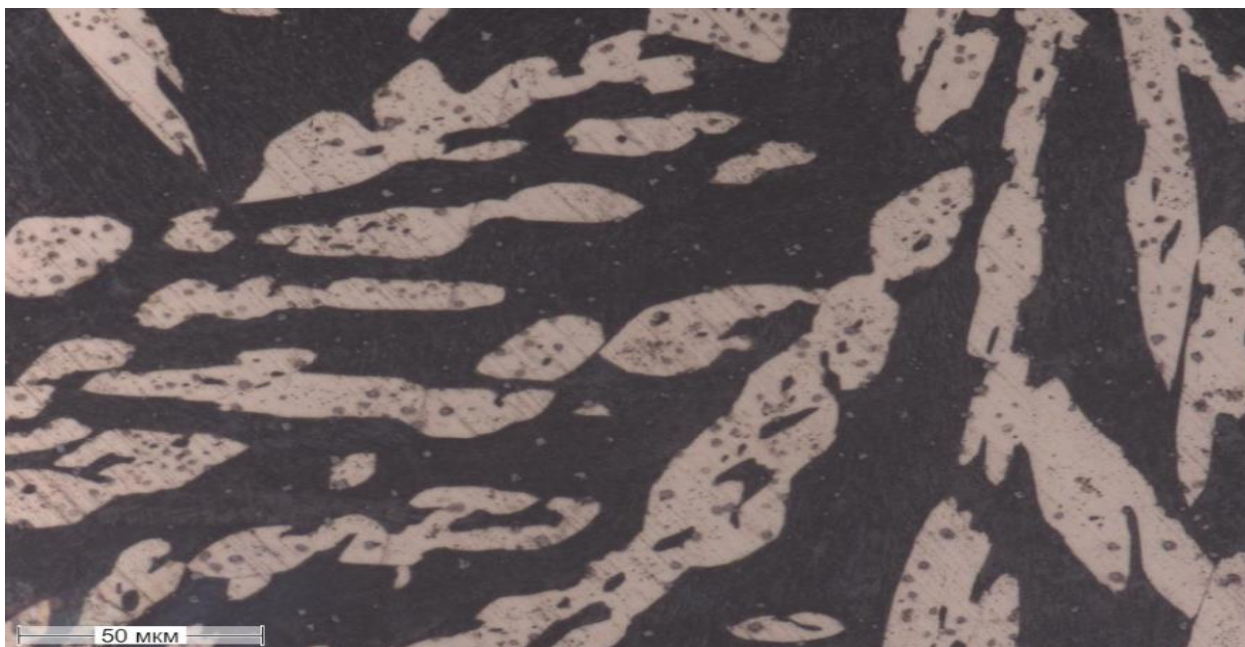


Рисунок 19 – Микроструктура образца № 2.3

На рисунке 20 представлена микроструктура образца № 2.4.

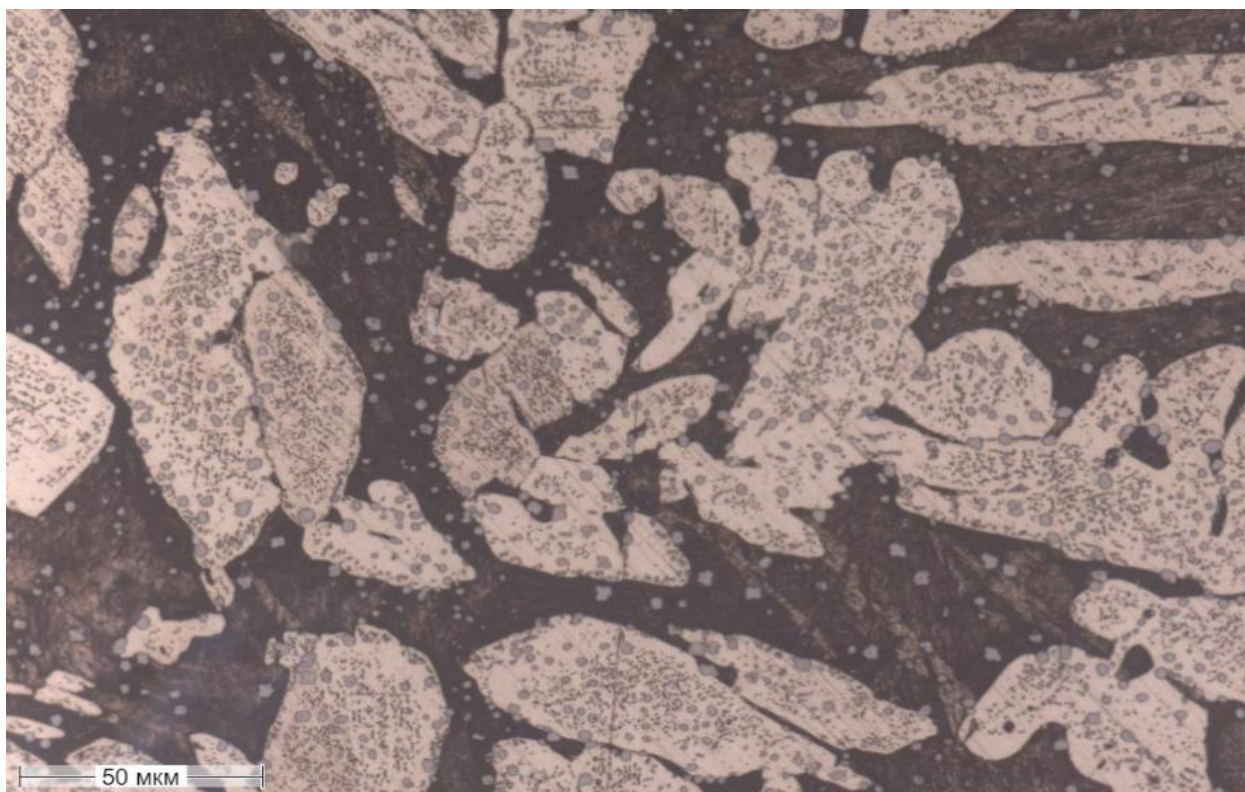


Рисунок 20 – Микроструктура образца № 2.4

На рисунке 20 представлена микроструктура образца под номером 2.4. Данный образец подвергался закалке с температуры 800 градусов и последующему отпуску при температуре 400 градусов в течении 1 часа. Данная температура отпуска значительно ниже эвтектоидного превращения, что обеспечивает значительную разницу термодинамических потенциалов исходной бета-фазы и образующихся $\alpha+\gamma_2$ фаз, как движущую силу эвтектоидного распада. В связи с чем количество бета фазы уменьшается в структуре, а количество смеси ($\alpha+\gamma_2$) увеличивается, причем в зернах α -раствора увеличивается и количество γ_2 – фазы.

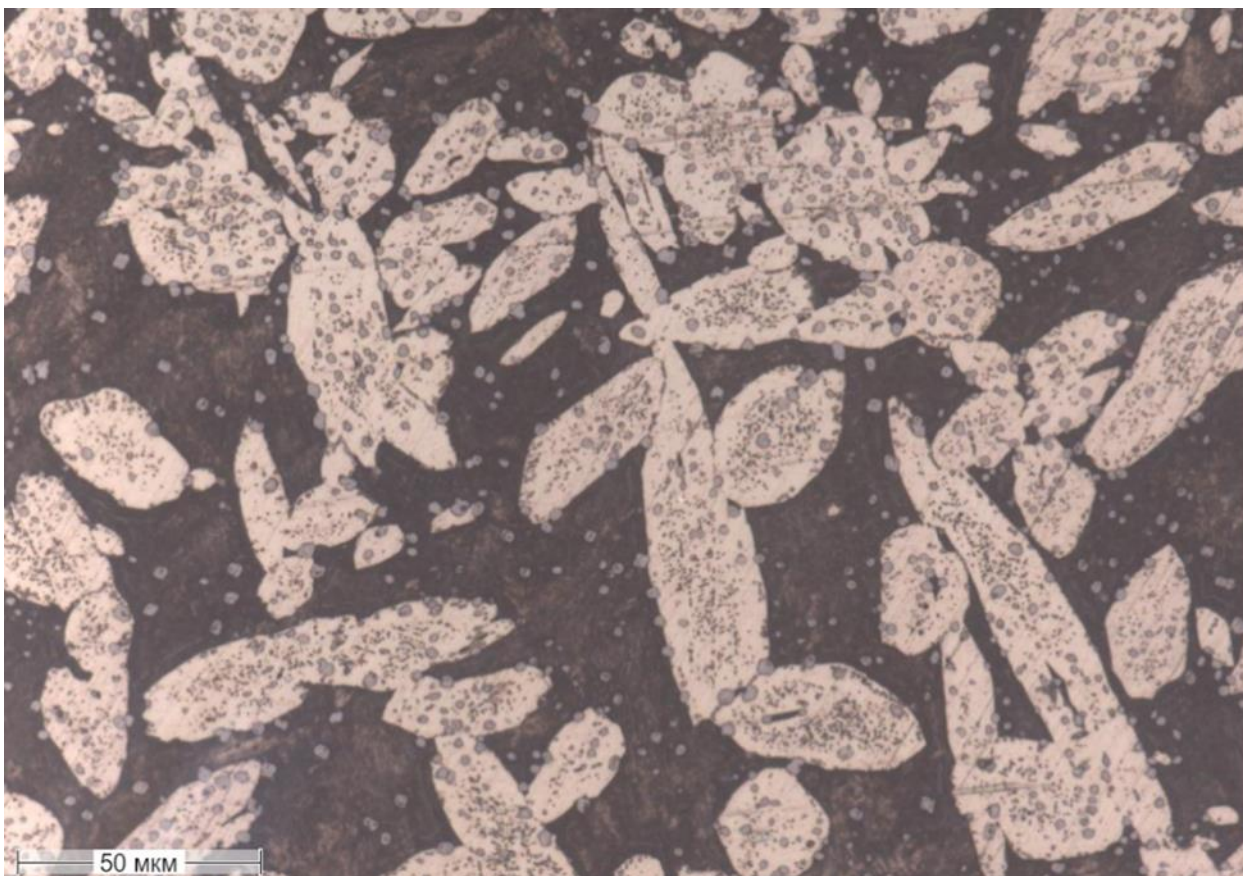


Рисунок 21 – Микроструктура образца № 2.5

На рисунке указана микроструктура образца 2.5 (рисунок 21), имеющего следующие параметры термической обработки: закалка с температуры 800 градусов и последующим отпуском при температуре 350 градусов в течении 2 часов. Температура 350⁰С лежит немного ниже линии перетектоидного превращения, соответствующей 363⁰С. Это обеспечивает и эвтектоидный распад и частично протекающее перетектоидное превращение, при котором происходит взаимодействие между: альфа и гамма-2 фазой, с образованием альфа-2 фазы. Таким образом некоторое количество γ_2 – фазы участвует в перетектоидной реакции, что способствует снижению ее количества.

Однако температура отпуска близка к линии перетектоидной реакции, поэтому наличие альфа-2 фазы может быть минимально, а присутствие γ_2 – фазы изменяется незначительно.

Анализ микроструктур вышеназванных трех образцов показал и различия в морфологии структурных составляющих. В образце 2.3 зерна альфа фазы более вытянутые, чем в 2.4. и 2.5. В образце 2.5. по сравнению с образцом 2.4 зерна альфа фазы немного мельче.

В образцах 2.4. и 2.5 на фоне бета-фазы явно дифференцируется еще одна мелкая фаза, округлой формы, морфология которой соответствует к(каппа)-фазе. Каппа фаза — тройной интерметаллид (Cu-Al-Fe) до 85% меди, 4,5- 5% железа и до 10% алюминия. Никель способствует образованию к-фазы

Содержание железа в исследуемом сплаве в размере 4.5% так же говорит в пользу присутствия данной фазы в сплаве. Однако для полной уверенности необходимо в дальнейшем провести рентгеноструктурный анализ для подтверждения наличия к-фазы в микроструктуре.

Рассмотрим микроструктуру образцов с наилучшим сопротивлением к износу. Это образцы 1.1, 1.5 и 3.1.

На рисунке 22 представлена микроструктура образца № 1.1.



Рисунок 22 – Микроструктура образца № 1.1

Данный образец подвергался термической обработке со следующими параметрами: температура закалки 950 градусов и последующий отпуск в течении 2 часов. Температура отпуска 350 градусов.

По микроструктуре образца № 1.1, изображенного на рисунке 22, явно видно количественное преимущество темной бета фазы.

Отпуск при температуре 350 градусов, ниже перетектоидного превращения приводит, в данном случае, к далеко неполному распаду бета фазы и в микроструктуре присутствуют чуть заметные светлые пятна альфа-фазы в небольшом количестве. Причем, в альфа-фазе отсутствуют вкрапления гамма-2 фазы.

На рисунке 23 представлена микроструктура образца № 1.5

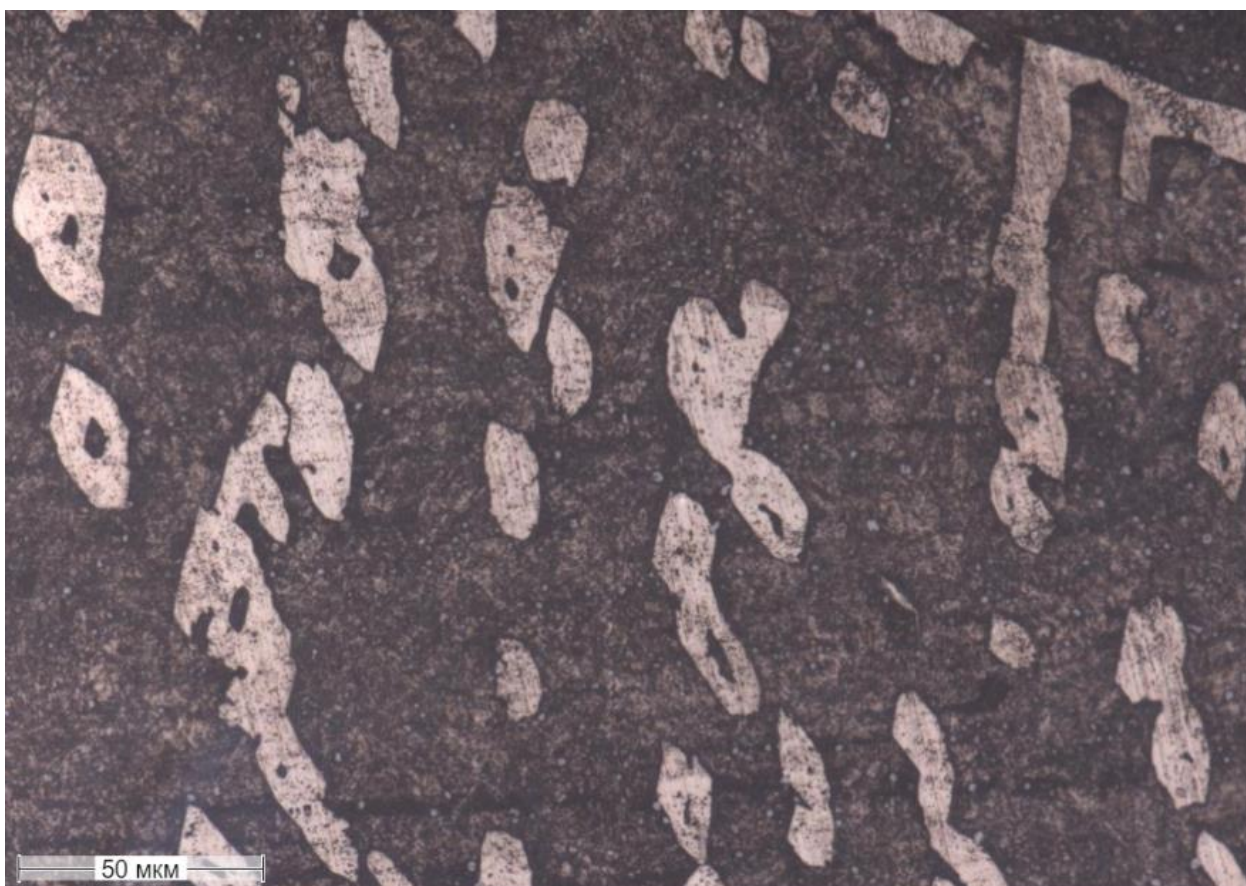


Рисунок 23 – Микроструктура образца № 1.5

На рисунке 23 представлен фотоснимок микроструктуры образца № 1.5. Данный образец имеет температуру закалки 900 градусов и последующим отпуском. Температура отпуска 400 градусов в течении одного часа.

Высокая температура закалки обеспечивает полную перекристаллизацию структуры в бета фазу. Не смотря на такое же время выдержки, как и образца 2.4, мы наблюдаем только небольшое количество альфа фазы и еще меньшее количество гаммы-2 фазы в зернах альфа-фазы. Форма зерен альфа-фазы вытянутая, зерна небольшого размера. Большую часть микроструктуры составляет бета фаза, ее примерно 65-70%. Оставшуюся долю занимают альфа, около 25-27%, и гамма, примерно 3-5% Гамма-2 фазы соответственно. Очевидно, что такое время выдержки недостаточно для распада бета -фазы.

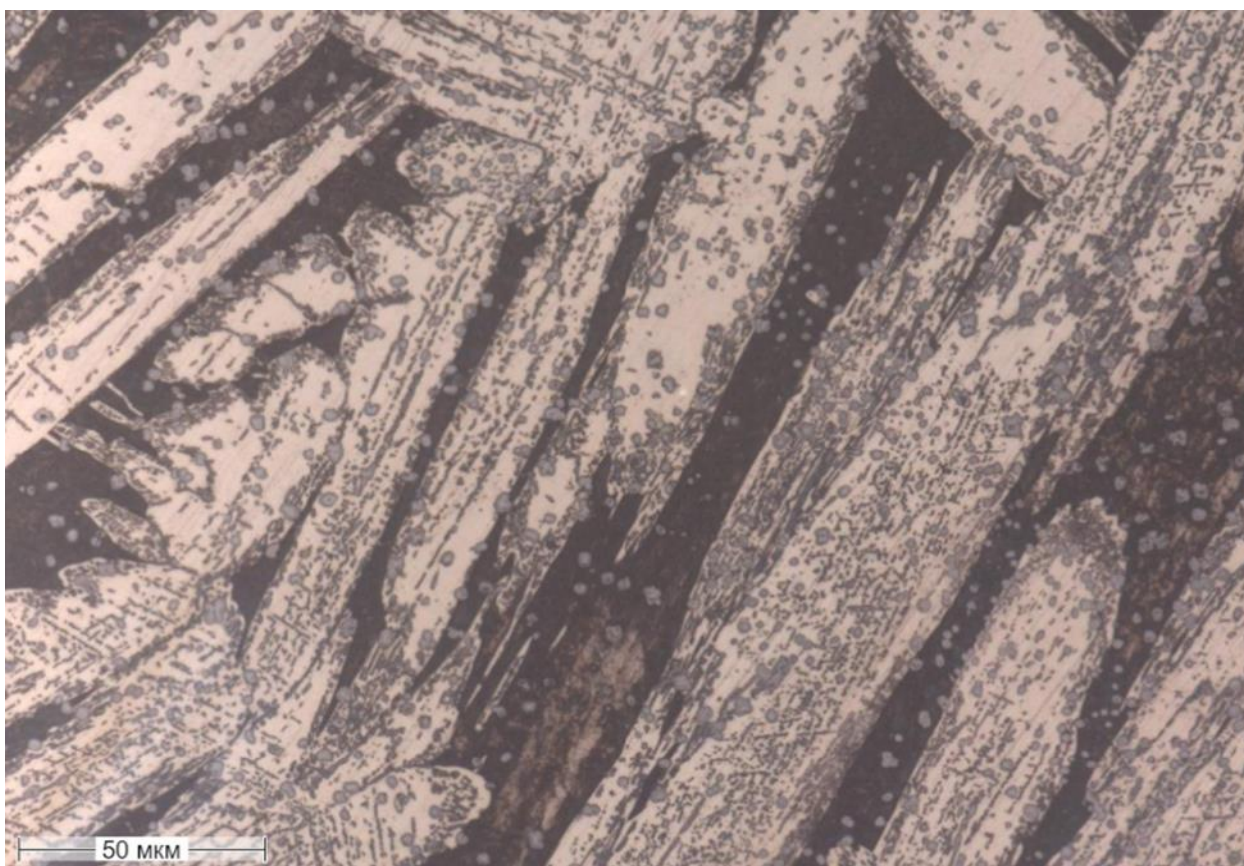


Рисунок 24 – Микроструктура образца № 3.1

Образец № 3.1 (рисунок 24), изображение микроструктуры которого изображено на рисунке, обладает наихудшим сопротивлением к износу.

Температурный режим термической обработки: температура нагрева под закалку 750 градусов, далее был отпущен в течении 2 часов при температуре отпуска в 400 градусов.

В микроструктуре наблюдаем очень крупные вытянутые зерна альфа - фазы с достаточно большим количеством гамма-2 фазы. Однако γ_2 -фаза распределена неравномерно по зернам альфа-раствора. В микроструктуре присутствуют зерна альфа-раствора с большим количеством γ_2 -фазы и зерна альфа-раствора, в которых присутствие упрочняющей фазы мало, а ее дисперсность невысока. Этому способствует закалка, проведенная с температуры, при которой формируется двух фазная структура $\alpha+\beta$, с большей объемной долей альфа фазы. При этом в структуре наблюдается значительно меньшее количество β -фазы с вкраплениями каппа -фазы.

3.4 Анализ результатов исследований

В таблице 5 сведены основные результаты по механическим испытаниям образцов после различных режимов термической обработки.

Таблица 5 – Номер образцов, режимы ТО для каждого образца и результаты на весовой износ и твердость

№ обр	Режим ТО		Результаты на весовой износ					Тв.обр азцов
	Закалка	отпуск	10 сек	20 сек	30 сек	40 сек	сумма	HV _{ср}
0- нуле- вой	не об- работан	не обработан	0,039	0,03 1	0,02 7	0,14 3	0,24	-
1.1	950 ⁰ С, вода	350- 2 часа	0,033	0,04 5	0,04 3	0,10 6	0,227	440
1.2	950 ⁰ С, вода	300- 2 часа	0,036	0,037	0,04	0,089	0,202	412
1.3	950 ⁰ С,	250 – 2 часа	0,037	0,043	0,045	0,095	0,22	376

	вода							
1.4	900 ⁰ С, вода	350 – 2 часа	0,034	0,04	0,04	0,1	0,214	391
1.5	900 ⁰ С, вода	400 – 1 час	0,038	0,039	0,045	0,102	0,224	406
1.6	900 ⁰ С, вода	450 – 1 час	0,044	0,044	0,041	0,09	0,219	402
1.7	900 ⁰ С, вода	650 – 1,5 часа	0,04	0,041	0,043	0,086	0,21	504
2.1	850 ⁰ С, вода	400 – 1 час	0,041	0,042	0,038	0,082	0,203	442
2.2	850 ⁰ С, вода	500- 0,5 часа	0,036	0,042	0,035	0,089	0,202	451
2.3	850 ⁰ С, вода	550 – 0,25 часа	0,039	0,035	0,037	0,09	0,201	476
2.4	800 ⁰ С, вода	400 – 1 час	0,035	0,035	0,038	0,083	0,191	477
2.5	800 ⁰ С, вода	350 – 2 часа	0,04	0,033	0,038	0,084	0,195	468
2.6	750 ⁰ С, воздух	не обработан	0,036	0,039	0,045	0,087	0,207	563
2.7	700 ⁰ С, воздух	не обработан	0,04	0,044	0,043	0,094	0,221	536
3.1	750 ⁰ С, вода	400 – 2 часа	0,045	0,053	0,052	0,098	0,248	512

В данной таблице указаны все выбранные нами режимы ТО для каждого образца и результаты на весовой износ и твердость. Каждый режим термической обработки выбирался на основании проведенных исследований по изучению влияние различных ТО на микроструктуру алюминиевых бронз.

Данная таблица наглядно показывает, что высокий показатель твердости не означает, что у образца будет высокий показатель сопротивления на износ. У худших образцов, № 1.1 и 3.1, по данной таблице, самые худшие результаты как на твердость, так и на весовой износ. Но если сравнить их режимы термической обработки, у них почти одинаковые температурные режимы под отпуск, но различные температуры нагрева под закалку. Это говорит о том, что температура закалки оказывает сильное влияние на твердость образцов. Также с понижением температуры нагрева под закалку, увеличился и износ у образца № 3.1, по сравнению с образцом 1.1. У каждого из образцов при изучении их микроструктуры было выявлено

существенное преимущество одной из фаз. В случае с образцов № 1.1 преимущество было на стороне бета фазы, а у образца № 3.1 большая объемная доля альфа фазы.

Анализ результатов микроструктурных исследований показал, что количественное преимущество одной из фаз в микроструктуре сплава негативно сказывается на износостойкости сплава.

Наилучшим режимом термической обработки является закалка с температуры 800⁰С в воде и последующим отпуском при температуре 400⁰С.

Названная температура нагрева под закалку обеспечивает формирование в основном бета фазы и незначительного количества альфа-фазы. Возможно, присутствие альфа-фазы в структуре закаленного сплава способствует ускорению распада (играет роль катализатора), бета-фазы при отпуске, что и обеспечивает ее распад до 50%. При этом формируется соотношение α/β как 45/55, характерное для износостойкой структуры. Отпуск при 400⁰С в нижнем температурном интервале эвтектоидного превращения способствует высокой дисперсности γ_2 -фазы, ее более равномерному распределению в зернах альфа – фазы и максимальной объемной доли.

Анализ экспериментальных исследований позволяет сформулировать следующие выводы по данному разделу.

Химический состав БрАЖН 10-4-4 позволяет отнести сплав к группе бронз с высокой способностью к упрочнению термической обработкой.

Максимально высокой износостойкостью обладает образец после закалки в воде с температуры 800⁰ С и последующего отпуска при 400⁰С в течение 1 часа. Близкие по значениям показатели износостойкости имеет образец аналогичным образом закаленный и отпущенный при температуре 350⁰С в течение 2 часов.

Микроструктура износостойких образцов состоит из β -фазы с вкраплениями κ - фазы и зерен α – твердого раствора с равномерно распределенной внутри дисперсной γ_2 -фазой.

Для повышения износостойкости алюминиевых бронз термической обработкой необходимо обеспечить соотношение фаз α/β близкое к 55/45 и высокую дисперсность упрочняющей γ_2 -фазы. Это достигается путем варьирования температуры закалки и времени отпуска в интервале температур эвтектоидного превращения.

Электронно-микроскопическими исследованиями или рентгеноструктурным анализом необходимо подтвердить присутствие κ -фазы в структуре износостойких образцов.

Выбранный режим термической обработки, позволяющий придать медному сплаву алюминиевой бронзы БрАЖН 10-4-4, из которой производятся изделия для предприятий, работающих в условиях трения-износа, позволяет получить оптимальные механические свойства для сплава, что позволяет увеличить ресурс материала.

Заключение

Проведен анализ литературного обзора и подобраны режимы термической обработки в соответствии с рекомендациями источников и предварительными исследованиями БрАЖ 9-4.

Подобрано современное и точное оборудование, для проведения различных видов экспериментов, необходимых для достижения результатов исследований.

Установлено влияние параметров упрочняющей термической обработки на микроструктуру, твердость и сопротивление к абразивному износу образцов из БрАЖН 10-4-4. Выявлены направления дальнейших исследований.

Определены режимы термической обработки для изделий из бронзы БрАЖН 10-4-4, позволяющих получить наилучший показатель сопротивлений к абразивному износу.

Обобщая результаты настоящих и предварительных исследований, можно сказать, что для повышения износостойкости алюминиевых бронз необходимо проводить закалку в воде из двухфазной области $\alpha+\beta$ и отпускать детали при температурах эвтектоидного распада бета - фазы.

Режим обработки с последующим происходящими фазовыми превращениями, является наиболее благоприятным для нашего медного сплава алюминиевой бронзы БрАЖН 10-4-4, позволяющего уменьшить затраты на производстве и увеличить срок службы детали, за счет получения микроструктуры с наилучшим показателем сопротивления абразивному изнашиванию.

Вполне возможно, что аналогичные исследования других марок алюминиевых бронз и сравнительный анализ успешных упрочняющих режимов термической обработки, позволят определить универсальный режим термической обработки, повышающий износостойкость, для близких по составу марок алюминиевых бронз.

По результатам работы сформулированы основные выводы:

а) сплав БрАЖН 10-4-4, благодаря своему химическому составу обладает высокой способностью к упрочнению термической обработкой.

б) максимальной износостойкостью обладают образцы микроструктура которых состоит из β -фазы с вкраплениями κ -фазы и зерен α -раствора с равномерно распределенной внутри дисперсной γ_2 -фазой, причем количество α -фазы незначительно превышает количество β -фазы.

в) количественное преимущество одной из фаз (как α , так и β) в микроструктуре сплава БрАЖН 10-4-4 негативно сказывается на износостойкости сплава. Данное преимущество сказывается на механических свойствах сплава из алюминиевой бронзы марки БрАЖН 10-4-4, что не подходит для применения в производстве.

г) рекомендовать к применению термическую обработку, состоящую из закалки в воде с температуры 800°C и последующего отпуска при 400°C в течение 1 часа для изделий из БрАЖН 10-4-4, как обеспечивающую высокую стойкость к абразивному изнашиванию.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Логинов Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы: учеб. пособие / УГТУ-УПИ. – 2-е изд., стер. – Екатеринбург, 2006. – 136 с.
2. Урвачев В.П., Кочетков В.В., Горина Н.Б. Ювелирное и художественное литье по выплавляемым моделям сплавов меди. – Челябинск: Металлургия. Челябин. отд-ние, 1991. – 168 с.
3. H J Meigh. Resistance to Wear of Aluminium Bronzes Chapter 10 of 'Cast and Wrought Aluminium Bronzes Properties, Processes and Structure. Copper Development Association. CDA Pub 126, 2000. p. 25.
4. Розенберг, В.М. Диаграммы изотермического распада в сплавах на основе меди: Справочник. / Розенберг В.М., Дзущев В.Т. – М.: Металлургия, 1989. – 326 с.
5. Ибатуллин И.Д. Триботехнические испытания на фрикционную совместимость: монография / СНЦ РАН. – Самара, 2014. – 217 с.
6. Thornton C.H. Aluminum bronze // Alloys Technical Data by CDA (UK). – 1986. – No. 82. – P. 91
7. Биронт, В.С. Материаловедение. Металловедение палладия и его сплавов [Текст]: учебное пособие/В.С. Биронт. Н.Н. Довженко, С.Н. Мамонов, И.В. Тихов, Б.П. Ходюков. ГУЦМиЗ. - Красноярск, 2007. - 152 с.
8. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди / М.Е. Дриц, Н.Р. Бочвар, Л.С. Гузей, Е.В. Лысова; Академия наук СССР им. Байкова. – М.: Наука, 1979. – 375 с.
9. Vin Callcut. Aluminum bronzes. Part I and II. Metallurgy of copper & copper alloys. – 37 p. – URL: <https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2002/08/aluminum2.html> (accessed 22 August 2019).
10. Способ термической обработки алюминиевых бронз: пат. 2013463 Рос. Федерация: МПК С22F1/08 / Щербакова Г.К., Ушакова Л.А., Железняк Л.В.; заяв. и патентообл. АО «Уралтрак». – № 5025927/02; заявл. 11.11.91;

опубл. 30.05.94

11. Термообработка бронзовых втулок [Электронный ресурс]. – URL: <https://tsvetmet.wordpress.com/2019/03/09/> (дата обращения: 15.08.2019).

12. Итин В.И. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений / В.И. Итин, Ю.С. Найбороденко. – Томск: Том. ун-та, 1989. – 214 с.

13. Новиков, И.И. Металловедение, термообработка и рентгенография [Текст]: учебник для вузов/И.И. Новиков, Г.Б. Строганов, А.И. Новиков. - М.: МИСИС, 1994-480 с.

14. ASM Handbook / ASM International Handbook Committee. – 2002. – 2174 p. (Vol. 4. Heat treating)

15. Белов, Н.А. Металловедение цветных металлов. Алюминиевые, магниевые и титановые сплавы [Текст]: учеб. пособие для студ. высш.уч.завед. / Н.А.Белов, А.А.Аксенов. - М.: МИСиС, 2005. -149с.

16. Schumacker W.J. Private communication to E.E. Denhart // Manager-Stainless Steel Research and Technology, Armco. – Feb. 1980.

17. Промышленные алюминиевые сплавы [Текст]: справочник/С.Г. Алиева, М.Б.Альтман, С.М.Амбарцумян и др., отв.ред.Ф.И.Квасов, И.Н.Фридляндер. -2-е изд.- М.: Металлургия, 1984. - 528 с.

18. Колачев, Б.А. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов [Текст]: учеб. пособие для вузов/ Б.А. Колачев, Р.М. Габидуллин, Ю.В. Пигузов. - М.: Металлургия, 1980. - 280 с.

19. Дроздов, А.А. Алюминиды никеля – основа для создания конструкционных жаропрочных сплавов нового поколения (Свойства, составы, совр. состояние, перспективы): дис. канд. техн. наук: защищена 14.02.2006: утв. 24.07.2006 /

20. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

21. Константинов Д.П. Исследование качественных и количественных

показателей микроструктуры бронзы БрАЖ-9-4, как основных факторов, определяющих уровень механических характеристик: выпускная квалификационная работа, бакалавр./ Д.П.Константинов. - Тольятти: ТГУ, 2022. - 57 с

22. А.В. Святкин, Л.И. Попова, П.Э. Шендерей. Моделирование микроструктуры алюминиевой бронзы БрАЖ 9-4, обеспечивающей повышенное сопротивление изнашиванию // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2020 Т. 2. №2. – С. 12 – 22.

23. MINITECH 300 DP1 Станок шлифовально-полировальный двух-дисковый [Электронный ресурс] URL: https://lucon.pro/index.php?route=product/product&path=9&product_id=7541 (дата обращения: 14 мая 2023г.).

24. MECAPRESS 3 Станок автоматический запрессовочный [Электронный ресурс] URL: <https://lucon.pro/ro/mecapress-3> (дата обращения: 14 мая 2023г.).