

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический Институт  
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

**УТВЕРЖДАЮ**  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.И. Темных  
подпись  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

## **БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**Направление 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»**

**Структурообразование в хромовой бронзе  
при производстве электродов для контактной сварки**

Научный руководитель

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

В.С. Казаков

Выпускник

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Е.А. Яковенко

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Л.А. Свечникова

Красноярск  
2019

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический Институт  
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.И.Темных  
подпись  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

Студентке Яковенко Елизавете Алексеевне

Группа МТ 15–01Б. Направление (специальность) 22.03.01

«Материаловедение и технологии обработки материалов»

Тема выпускной квалификационной работы: «Структурообразование в хромовой бронзе при производстве электродов для контактной сварки»

Утверждена приказом по университету № 19099/с от 19.12.2018 г.

Руководитель ВКР: В.С. Казаков, доцент, к.т.н. кафедры МиТОМ

Исходные данные: Образцы электродов контактной сварки из хромовой бронзы марки БрХ1, полученные по различным технологиям (литье, литье и горячая штамповка, механическая обработка резанием, холодная пластическая деформация). Исследовать структуру и свойства электродов контактной сварки из хромовой бронзы, в зависимости от технологий производства.

Перечень разделов ВКР: введение, обзор литературных данных по проблеме, методики исследований электродов контактной сварки из хромовой бронзы, исследование структуры электродов, заключение работы.

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_

подпись

В.С. Казаков

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_

подпись

Е.А. Яковенко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

## АННОТАЦИЯ

Контактная сварка используется в промышленности, массовом выпуске или серийном производстве одинаковых по типу изделий. Используется в авиационной промышленности и на предприятиях машиностроения.

Хромовые бронзы относятся к дисперсионно твердеющим сплавам и имеют хорошее сочетание физических, механических и эксплуатационных свойств, именно поэтому такой материал был выбран для изготовления электродов для контактной сварки.

Применение различных технологий, позволяют управлять макро- и микроструктурой, прочностными и эксплуатационными характеристиками, изменяя структурно-энергетическое состояние сплава. Современное представление об эффективном управлении свойствами материалов основывается на возможности создания условий, при которых происходит самоорганизация заданного структурно-фазового состояния.

В данной бакалаврской работе будут рассмотрены требования, назначение, конструкция электродов контактной сварки из хромовой бронзы, а также будут представлены исследования структуры электродов и технологии их получения.

Ключевые слова: хромовая бронза, электроды контактной сварки.

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа по теме «Структурообразование в хромовой бронзе при производстве электродов для контактной сварки», содержит 57 страниц, 36 рисунков, 14 таблиц, 30 используемых источников.

Цель работы: Исследовать структуру и свойства электродов контактной сварки из хромовой бронзы, в зависимости от технологий производства.

Задачи:

- 1 Изучить конструкции электродов, их назначение, требования и технологии получения
- 2 Провести металлографическую подготовку образцов электродов контактной сварки из хромовой бронзы
- 3 Провести исследование структуры образцов электродов, которые были получены и термически обработаны разными способами
- 4 Сравнить механические и физические свойства полученных образцов.

В ходе работы проведен комплекс исследований. Анализ полученных результатов показывает, что для того, чтобы получить нужный по химическому составу сплав хромистой бронзы БрХ1 подходит применение медных таблеток с содержанием наноструктурированных частиц хрома.

Методика плавки, используемая в данном случае, обеспечивает равномерное распределение хрома в сплаве, что положительно отражается на твердости и электропроводности электродов.

Показано, что использование совмещенного способа литья и штамповки, а также необходимой термообработки, позволяют получать электроды, по твердости, электропроводности и стойкости, превосходящие электроды из аналогичных сплавов, полученных по традиционной технологии литья.

Так как износ образцов, полученных методом литья и горячей штамповки, меньше, чем у электродов из сплава БрХ1, полученных литьем, то такое производство значительно снижает стоимость этих электродов, повышая экологичность безотходного производства.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Литературный обзор .....	8
1.1 Конструкции электродов.....	8
1.2 Требования к электродам .....	12
1.3 Технология изготовления электродов контактной сварки .....	13
1.4 Материалы электродов для контактной сварки.....	17
1.5 Хромовая бронза .....	19
1.6 Термическая обработка хромовой бронзы .....	22
2 Методики исследований.....	28
2.1 Приготовление микрошлифов .....	28
2.2 Исследование микроструктуры .....	31
2.3 Измерение твердости и микротвердости.....	36
2.4 Измерение электрического сопротивления.....	39
3 Исследовательская часть .....	41
3.1 Микроструктура сплава БрХ1 .....	41
3.2 Испытание оценки работоспособности электродов.....	49
3.3 Определение твёрдости и электропроводности образцов .....	52
Заключение .....	55
Список использованных источников .....	56

## ВВЕДЕНИЕ

Контактная сварка – процесс формирования неразъемного сварного соединения посредством нагрева металла проходящим через него электрическим током и пластической деформации зоны соединения под действием сжимающего усилия.

Контактная сварка используется в промышленности, массовом выпуске или серийном производстве одинаковых по типу изделий. Используется в авиационной промышленности и на предприятиях машиностроения.

Операция соединения свариваемых деталей при контактной сварке происходит путём образования связей между атомными агрегатами в области контакта этих деталей. При этом для формирования физического контакта и активации соединяемых поверхностей расходуется механическая и тепловая энергия, подводимая извне [1].

Хромовые бронзы относятся к дисперсионно твердеющим сплавам и имеют хорошее сочетание физических, механических и эксплуатационных свойств, именно поэтому такой материал был выбран для изготовления электродов для контактной сварки [2].

Применение различных технологий, позволяют управлять макро- и микроструктурой, прочностными и эксплуатационными характеристиками, изменяя структурно-энергетическое состояние сплава. Современное представление об эффективном управлении свойствами материалов основывается на возможности создания условий, при которых происходит самоорганизация заданного структурно-фазового состояния [3].

В данной работе будут рассмотрены требования, назначение, конструкция электродов контактной сварки из хромовой бронзы, а также будет исследована структура электродов и технологии их получения.

# 1 Литературный обзор

## 1.1 Конструкции электродов

Электроды для электродуговой сварки существенно отличаются от токопроводящих элементов для контактной сварки, и не подходят для данного вида работ, т. к. в момент сварки детали сжимаются контактными частями сварочного аппарата. Электроды для контактной сварки способны проводить электрический ток, выдерживать нагрузку на сжатие и отводить тепло.

Диаметр электродов определяет насколько качественно, и прочно будут сварены детали. Их диаметр должен быть в 2 раза толще самого сварного узла. В соответствии с государственными стандартами они бывают диаметром от 10 до 40 мм [1].

Форму электрода определяет свариваемый металл. Данные элементы, имеющие плоскую рабочую поверхность, используют для сварки сталей обыкновенного качества. Сферическая форма идеально подходит для соединения меди, алюминия, высокоуглеродистых и легированных сталей. Такая форма наиболее устойчива к сгоранию. Благодаря ей электроды способны выполнить большой объем сварных швов до заточки.

Посадочное место электрода часто выполнено с резьбой или конусной формы. Такая конструкция помогает эффективно выполнить сжатие деталей и избежать потерь тока. Посадочный конус может быть коротким, его применяют при малых усилиях и низких токах, что не выгодно. Если используется шпилька с нарезанной резьбой, то чаще через накидную гайку. Резьбовое крепление используется в специальных многоточечных машинах, так как важен одинаковый зазор между клешнями.

Во время контактной сварки поверхность детали должна быть  $90^\circ$  по отношению к оси двух электродов [4].

Самым изнашиваемым местом электрода является его сферическая рабочая часть. Электрод не принимается, если повышение размеров торца больше 20 % от первичных размеров. Конструкция электродов основывается на конфигурации свариваемой поверхности.

Различают следующие исполнения инструмента:

- с конической посадочной и цилиндрической рабочей частью;
- с коническими посадочной и рабочей частью, и переходным цилиндрическим участком;
- со сферическим рабочим торцом;
- со скошенным рабочим торцом.



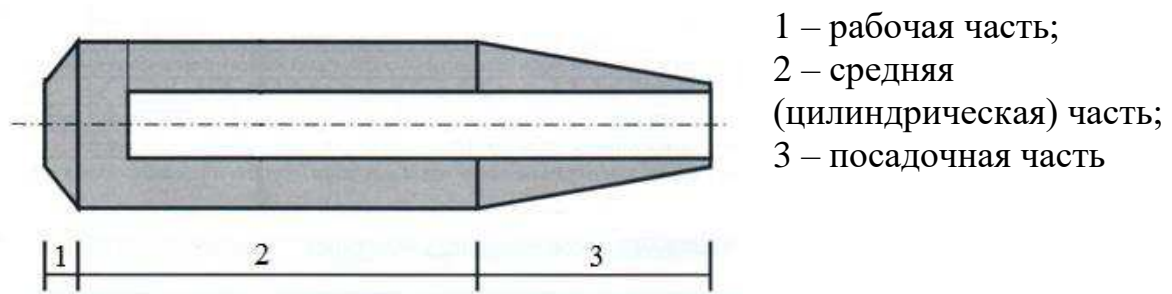


Рисунок 1 – Конструкция электрода для точечной контактной сварки

На рис. 1 изображена схема конструкции электрода для контактной сварки. Внутри электрода проходит внутренний канал, в который подается охлаждающая среда через трубку. Рабочая часть (1) электрода контактной сварки имеет плоскую параллельную форму поверхности; радиус сферы  $R_{эл}$  или диаметр рабочей поверхности  $d_{эл}$  выбирают в зависимости от толщины и материала свариваемых деталей. Угол конуса рабочей части обычно составляет  $30^\circ$ . Средняя часть (2) позволяет сохранять высокую прочность электрода и возможность использования экстракторов или иного инструмента для их демонтажа. Различные методики применяются производителями для точного расчета размеров электродов. В СССР согласно ОСТ 16.0.801.407–87 были отрегулированы типоразмерные ряды [4]:  $D_{эл} = 12, 16, 20, 35, 32, 40$  мм.

Диаметр электрода рассчитывается по формуле:

$$D_{эл} = (0,4 - 0,6)\sqrt{F_{эл}}, \text{ мм}, \quad (1.1)$$

где  $F_{эл}$  – максимальное усилие сжатия машины (Н).

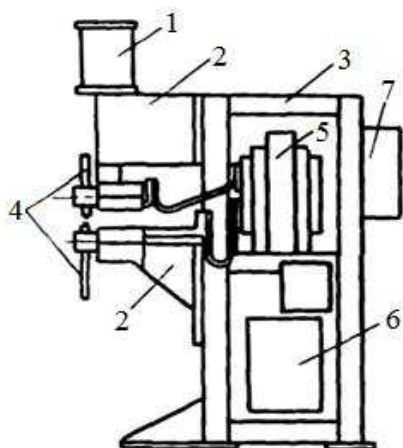
Для плотной установки в электрододержатель посадочная часть (3) должна обладать конусностью и избавлять от протечек охлаждающей воды. Конусностью 1 : 10 обладают электроды диаметром 12–25 мм, конусностью 1 : 5 электроды диаметром 32–40 мм. Длина конусной части должна быть более или равна  $1,25D_{эл}$ . Окончательную обработку посадочной части производят с чистотой не ниже 7–го класса.

Диаметр внутреннего канала охлаждения определяется высокой прочностью и расходом охлаждающей воды на электрод и рассчитывается по формуле:

$$d_0 = (0,4 - 0,6) D_{эл}, \text{ мм} \quad (1.2)$$

На эксплуатационные характеристики, а именно на стойкость и ресурс работы электрода сильно влияет расстояние от рабочей поверхности электрода до дна внутреннего канала.

Если это расстояние небольшое, то лучше происходит охлаждение электрода, но тем меньше переточек может выдержать электрод [5].



- 1 – привод давления;
- 2 – верхняя и нижняя консоли;
- 3 – корпус;
- 4 – верхний и нижний электродержатели;
- 5 – источник сварочного тока;
- 6 – прерыватель сварочного тока;
- 7 – регулятор работы машины

Рисунок 2 – Конструктивная схема точечной машины

На рис. 2 представлена конструктивная схема точечной машины прессового типа. Основными узлами любой точечной машины являются: привод давления 1, служащий для перемещения электрода и создания усилия на свариваемых деталях; верхняя и нижняя консоли 2 с токоподводами, воспринимающие механические усилия при сжатии свариваемых деталей; корпус или станина 3 машины для сборки всех узлов и восприятия усилия при сжатии свариваемых деталей; верхний и нижний электродержатели 4 со сменными электродами – для подвода сварочного тока и создания механического усилия на деталях; источник сварочного тока 5 – сварочный трансформатор с переключателем ступеней; прерыватель сварочного тока 6, регулятор работы машины 7. К каждому из этих узлов предъявляются требования, обусловленные назначением точечной машины [6].

Таблица 1 – Размеры электродов и роликов для контактной сварки

Толщина тонкого листа, мм	Электроды			Ролики		
	$D^*$	$d_{эл}$	$R_{эл}$	$S^*$	$f$	$R_{эл}$
0,3	12	3	15–25	6	3	15–25
0,5	12	4	25–50	6	4	25–30
0,8	12	5	50–75	10	5	50–75
1,0	12	5	75–100	10	5	75–100
1,2	16	6	75–100	12	6	75–100
1,5	16	7	100–150	12	7	100–150
2,0	20	8	100–150	15	8	100–150
2,5	20	9	150–200	18	10	150–200
3,0	25	10	150–200	20	10	150–200



*a*



*б*



*в*

Рисунок 3 – Различные конструкции электродов контактной сварки:  
*a* – конический с увеличенной плоской контактной поверхностью;  
*б* – прямой с увеличенной плоской контактной поверхностью;  
*в* – прямой плоский с уменьшенным торцом

Распространение получили электроды для точечной сварки с цилиндрической и сферической рабочей поверхностью и с плоской и сферической поверхностью, а так же ролики. В зависимости от толщины свариваемых деталей выбирают форму и размеры рабочей поверхности электродов; для многих металлов форма поверхности может быть плоской (цилиндрической для роликов) или сферической (табл. 1). Типы различных конструкций электродов контактной сварки представлены на рис. 3 [7].

## 1.2 Требования к электродам

В отличие от электродов, используемых при дуговой сварке, электрод, применяемый при контактной сварке, представляет собой часть вторичного контура сварочной машины, непосредственно соприкасающуюся со свариваемыми деталями. Электроды обеспечивают подачу электрического тока, который, в свою очередь расплавляет металл в месте образования сварного шва, кроме этого они осуществляют передачу силы, необходимой для сжатия свариваемых заготовок [8]. Тепло, которое выделяется в процессе сварки также отводят электроды. Усилия, что передаются электродами мощных контактных сварочных машин, могут достигать нескольких сотен тонн, а ток, протекающий через электроды может составлять 100000 А. Число циклов сварки может достигать 200–300 в минуту, а в некоторых случаях и больше [9].

Для обеспечения хорошего контакта между свариваемыми заготовками, сварка начинается с предварительной нагрузки, что сжимает детали. Ток, который пропускается между электродами, прогревает свариваемые детали. Неравномерный прогрев некоторых частей электрода, наиболее часто в случае быстрого охлаждения электрода водой, приводит к появлению тепловых напряжений в полости электрода.

Все указанные факторы непостоянны как в случае одного сварочного цикла, так и при переходе к следующим циклам сварки. К изменению тепловыделения, теплоотвода, удельного давления и плотности тока приводит износ электродов для контактной сварки и следующее за этим изменение площади контактной поверхности, а значит, вместе с тем изменяются условия работы электродов. Перечисленные факторы влияют на разогрев электродов в начальный период их работы, перекосы электродов и в конечном итоге могут привести к неточной сборке всей свариваемой конструкции [10].

Сложные условия эксплуатации электродов контактной сварки основываются на требованиях к их конструкции.

Электрод и его рабочая часть должны иметь:

- высокую электропроводность и теплопроводность;
- контактную поверхность определенной формы и размеров для надежного подвода тока к свариваемым заготовкам и подачи на них давления;
- высокую прочность при постоянных нагревах и охлаждениях;
- высокую устойчивость против окисления и износа;
- действенный и эффективный теплоотвод;
- удобство и надежность монтажа;
- форму, которая гарантирует достаточную жесткость и свободный доступ к месту сварки.

Удовлетворить перечисленные требования можно только при верном выборе конструкции электродов контактной сварки, материала и технологии их изготовления. Огромное влияние на работу электродов оказывает своевременный уход за электродами в ходе их эксплуатации, а также выбор технологии сварки.

### 1.3 Технология изготовления электродов контактной сварки

В массовом производстве и при большом объеме сварки расходуется огромное количество электродов. Значительно влияют на стоимость процесса сварки дороговизна изготовления электродов, затраты на металл и на оплату труда. Вследствие этого очень важно выбрать наиболее рациональную технологию изготовления электродов, которая зависит от металла, конструкции, формы, размеров и расхода этих электродов. Для изготовления электродов нельзя использовать изношенное оборудование и доверять их выполнение рабочим с низким разрядом, так как от электродов напрямую зависит качество и надежность сварных соединений [11].

Металл, который доставляют для изготовления электродов, должен обладать сертификатом о качестве и полностью соответствовать техническим условиям. После того как поступит металл, необходимо выборочно померить твердость в разных местах заготовки. Также рекомендуется произвести химический или спектральный анализ, измерить электропроводность для определения химического состава сплава.

Электроды и ролики изготавливают из заготовок, которые поступают с металлургических заводов, они могут быть из круглого, плоского проката, а также изготовлены литьем. К окончательной обработке заготовок электродов относится механическая обработка (фрезерование, точение), но при поступлении на эту операцию электроды должны обладать минимальной необходимой твердостью и другим комплексом механических свойств. Если требуется упрочняющая деформация или термическая обработка, то они должны выполняться до окончательной обработки.

На многие предприятия прутки для будущих электродов поступают в отожженном или термически необработанном состоянии. На автомобильных заводах, где расход электродов огромный, прямые электроды производятся способом холодной штамповки из прутков, в связи с этим отходы металла в стружку составляют от 5 до 7%. Но из-за сложности проведения термической обработки почти невозможно осуществить выпуск из термоупрочняемых сплавов электродов высокого качества. В большинстве случаев себестоимость производства электродов на заводах-потребителях весьма высокая. Выгоднее закупать электроды на специализированном предприятии, так как они там намного дешевле в изготовлении [12].

Применение различных технологий, позволяют управлять макро- и микроструктурой, прочностными и эксплуатационными характеристиками, изменяя структурно-энергетическое состояние сплава. Современное представление об эффективном управлении свойствами материалов основывается на возможности создания условий, при которых происходит самоорганизация заданного структурно-фазового состояния [2].

Технологии, используемые в настоящее время для получения медно-хромовых сплавов и дисперсно-упрочненных композиционных материалов, требуют сложных в обслуживании и в то же время дорогих плавильных агрегатов. Был разработан ресурсосберегающий способ [14] приготовления хромо-

вых бронз и получения электродов контактной сварки на специализированной установке (рис. 4) совмещенным способом литья и штамповки, что позволяет перерабатывать вторичное сырье, технологически упростить и экономически удешевить процесс изготовления электродов [13].

Технология плавки. Для получения медного расплава, использовали отходы медного лома типа А 1/1 по ГОСТ 1639–93. Масса загружаемого в графитовый тигель индукционной печи металла составляла 1 кг. Плавку осуществляли под слоем древесного угля, толщина слоя 25–30 мм, при рабочей частоте печи  $44 \pm 4$  кГц. Медный расплав раскисляли фосфором, который добавляли в виде лигатуры МФ 9 ГОСТ 4515–93 в количестве 0,7 %. Затем в раскисленный расплав вводили легирующий элемент в виде таблетки (рис. 5), состоящей из 83 % медного порошка марки ПМС–1 ГОСТ 4960–75 и 17 % наноструктурированных частиц хрома Х99 ГОСТ 5905–79.

Перемешивание жидкого металла происходило под действием переменного электромагнитного поля с частотной модуляцией тока. Это дает возможность получать в индукционной печи однородный по химическому составу сплав [15].



*a*



*б*

Рисунок 4 – Специализированная установка для получения электродов:  
*a* – фронтальный вид; *б* – вид сбоку



Рисунок 5 – Легирующий элемент  
(83 % медного порошка марки ПМС–1 и  
17 % наноструктурированных частиц хрома Х99)

Технология получения электродов. Заливку расплавленного металла (рис. 5) осуществляли в матрицу технологической оснастки (рис. 6).



Рисунок 5 – Расплавленный металл хромовой бронзы



Рисунок 6 – Заливка расплавленного металла хромовой бронзы

После остывания сплава до температуры 850–900 °С, штамповали (рис. 7) пуансоном охлаждающий канал в электроде, затем открывали подвижным клином дно матрицы и проталкивали электрод пуансоном в охлаждающую камеру, находящуюся в основании прессы для закалки в проточной воде. Полученный образец электрода представлен на рис. 8.



Рисунок 7 – Штамповка охлаждающего канала



*а*

*б*

Рисунок 8 – Образец полученного электрода:  
*а* – до механической обработки; *б* – после механической обработки

Старение электродов осуществляли в муфельной печи СНОЛ–1.62.5.1/11–ИЗ при температуре 450 °С в течение 4 часов, при котором достигается наиболее высокий уровень физико-механических свойств (твердость и электропроводность) [16].



## 1.4 Материалы электродов для контактной сварки

Любой материал для электродов контактной сварки не подойдет для этой операции. Сама контактная сварка предполагает высокие температуры, сжатие, напряжение, неравномерный прогрев электрода и прочее. Значит, металл, из которого будут сделаны электроды, должен обладать свойствами, позволяющими изделию сопротивляться каким-либо нагрузкам. Ведь качество сварного шва зависит от того, как долго форма электрода будет оставаться неизменной. Если форма начнет меняться под воздействием каких-либо нагрузок, то сразу начнет падать качество соединений [16].

Прочность на разрыв является одним из важных факторов качества сварного шва. Это определяется температурой сварной точки и зависит от теплофизических свойств материала проводника.

Медь в чистом виде не подходит для электродов, так как она очень пластичная и не имеет необходимой упругости, чтобы вернуться в первоначальную форму. Электроды требуют постоянной замены, а стоимость меди относительно высокая и весь процесс сварки мог резко подорожать [17].

Использование упрочненной меди также оказалось неподходящим, так как снижение температуры рекристаллизации приводит к тому, что с каждой следующей сварной точкой износ рабочей поверхности будет расти. Но, эффективными оказались сплавы меди с другими металлами. Например, твердость сплаву при нагреве добавили кадмий, бериллий, магний и цинк. А железо, никель, хром и кремний позволяют выдерживать частые тепловые нагрузки и стабилизировать темп работы.

Электропроводность меди равна  $0,0172 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ . Если этот показатель низкий, то такой сплав окажется наиболее подходящим для электродов контактной сварки.

Если нужно сварить заготовки из разных металлов или детали разной толщины, тогда электро- и теплопроводность электрода должна быть до 40 % от данного свойства чистой меди. Но если выполнить весь проводник из такого сплава, то он будет очень быстро нагреваться, так как имеет высокое сопротивление.

Если правильно подобрать технологию составной конструкции, то можно ощутимо сэкономить средства. В таких конструкциях сплавы, используемые в основании, подбирают с высоким показателем электропроводности, а наружную или сменную часть изготавливают из тепло- и износостойких материалов.

В зависимости от условий работы и поставленных задач, сплавы делятся на:

1 Тяжелые условия. Электроды, работающие при температуре до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , выполнены из сплавов бронз, хрома и циркония. Для сварки нержавеющей стали используют сплавы бронз, легированных титаном и бериллием.

2 Средняя нагрузка. Сварку стандартно углеродистых, медных и алюминиевых деталей, производят электродами из сплавов, в которых марка меди для электродов, способная работать при температуре до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

3 Легко нагруженные. Сплавы, в состав которых входит кадмиевая, хромистая и кремненикелевая бронзы, способны работать при температуре до 200 °С.

Согласно ГОСТ–2601 [17], главным критерием качества сварного шва является его прочность на разрыв или сдвиг. Она зависит от интенсивности тепловой мощности в зоне электрического разряда, а потому связывается в первую очередь с теплофизическими характеристиками материала электродов. Использование медных электродов малоэффективно по двум причинам. Во-первых, медь пластичный металл, и она не обладает упругостью, способной восстановить геометрическую форму электродов после сварки. Во-вторых, медь весьма дефицитна, а частая замена электродов обуславливает и высокие финансовые затраты [18].

Выбор материала для электродов точечной сварки зависит также и от конкретных задач процесса. Можно выделить три группы материалов для электродов контактной сварки:

1 Электроды, предназначенные для проведения контактной сварки в жёстких условиях (непрерывное чередование циклов, поверхностные температуры до 450–500 °С). Их изготавливают из бронз, включающих хром и цирконий (Бр.Х, Бр.ХЦр 0,6–0,05). К этой же группе относят никель-кремнистые бронзы (Бр.КН1–4) и бронзы, дополнительно легированные титаном и бериллием (Бр.НТБ), используемые для точечной сварки нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов.

2 Электроды, применяемые при контактных температурах на поверхности до 250–300 °С (сварка обычных углеродистых и низколегированных сталей, медных и алюминиевых изделий). Их производят из медных сплавов марок МС и МК.

3 Электроды для относительно лёгких режимов эксплуатации (поверхностные температуры до 120–200 °С). В качестве материалов применяется кадмиевая бронза Бр.Кд1, хромистая бронза Бр.Х1, кремненикелевая бронза Бр.НК и др. Такие электроды могут использоваться также и для роликовой контактной электросварки.

Следует отметить, что по убыванию удельной электропроводности (по отношению к чистой меди) эти материалы располагаются в следующей последовательности:

Бр.ХЦр 0,6–0,05→МС→МК→Бр.Х0,7→Бр.Х1→Бр.НТБ→Бр.НК→Бр.Кд1→Бр.КН1–4. Например, разогрев до требуемой температуры электрода, изготовленного из бронзы Бр.ХЦр 0,6–0,05 произойдёт примерно вдвое быстрее, чем полученного из бронзы Бр.КН1–4.

Комплексом необходимых свойств для производства электродов контактной сварки арматуры обладает хромовая бронза [19].

Марка БрХ1 почти полностью состоит из меди (а это 98,5–99,6 %) с добавлением 0,4–1,2 % хрома; содержание дополнительных примесей не должно превышать 0,3 %. Такой химический состав соответствует ГОСТ 18175–78; сплав относится к категории безоловянных бронз, которые обрабатываются

давлением, то есть деформируются. Заготовки производятся в виде прутков, полос или листов (в этом случае форма поперечного среза тоже может варьироваться, образуя т. н. круг, шестигранник), далее они подготавливаются к использованию по назначению и перерабатываются. Бронзовый пруток БрХ1 может выпускаться мерной и немерной длины. Обладают такие изделия высокой тепло- и электропроводимостью, в прочем на уровне других сплавов из меди, в том числе других марок бронзы, но отличительной чертой является механическая прочность, наряду с прочностью на разрыв и хорошей растяжимостью. Чтобы увеличить прочность долговечного материала используют закалку и искусственное старение, как способы термической обработки.

### **1.5 Хромовая бронза**

Хромовые бронзы – это медно-хромовые или более сложные по химическому составу медные сплавы, в которых упрочнение после закалки и старения происходит в результате выделения из твердого раствора дисперсных частиц хрома или хромосодержащих соединений. Так как бронзы обладают высокой электро- и теплопроводностью, то они относятся к жаропрочным медным сплавам [19].

Хром в медных сплавах оказывает большое влияние на механические и физические свойства меди. Он, в большой степени, упрочняет медь, повышает уровень ее жаропрочности и значительно увеличивает температуру рекристаллизации меди.

После термической или термомеханической обработки хромовые бронзы стали относить к дисперсионно твердеющим сплавам, так как они имеют хорошее сочетание физических, механических и эксплуатационных свойств. Термическая обработка состоит из закалки, которая фиксирует пересыщенный твердый раствор, и старения, в результате которого происходит распад с выделением дисперсных частиц фазы-упрочнителя. В термомеханическую обработку входит холодная пластическая деформация (между закалкой и старением), влияющая на формирование структуры при старении, изменяя кинетику распада твердого раствора. Прочность выше у сплавов, прошедших термомеханическую обработку, а не у сплавов, которые подверглись старению без предварительной деформации. Но если температура эксплуатации выше температур рекристаллизации хромовых бронз, то применение термомеханической обработки становится неэффективным [2].

Так же хромовые бронзы часто подвергают промежуточному отжигу, для того чтобы повысить пластичность между операциями холодной деформации. Отжигу подвергают также готовую металлопродукцию перед последующим изготовлением из нее изделий различными способами пластической деформации (штамповка, ковка, отбортовка и др.).

Свойства двойных хромовых бронз определяются особенностями физико-химического взаимодействия между компонентами в системе Cu–Cr. Наибольший практический интерес имеет часть диаграммы состояния Cu–Cr, показанная на рис. 9.

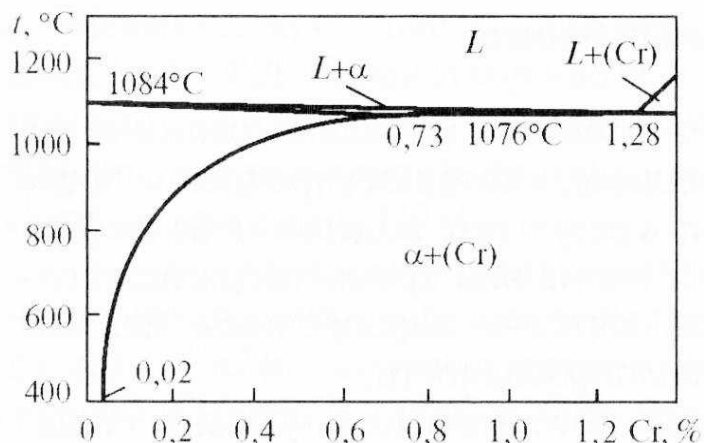


Рисунок 9 – Диаграмма состояния Cu–Cr

В системе Cu–Cr твердом состоянии существуют две фазы:  $\alpha$ -твердый раствор хрома в меди и твердый раствор на основе хрома. Однако вследствие малой растворимости меди в хrome в твердом состоянии, второй твердой фазой является практически чистый хром [19].

Двойные хромовые бронзы мало отличаются по химическому составу (табл. 3) и имеют близкие значения физических и механических свойств.

Относительно фаз, присутствующих в сплавах, богатых медью, между данными различных авторов нет расхождений: твердый раствор на основе меди ( $\alpha$ ) и Cr (точнее, твердый раствор меди в хrome), температура эвтектической точки 1074,8 °C при концентрации, равной 1,28 % Cr.

Средняя растворимость хрома в меди в твердом состоянии по данным многочисленных авторов приведена в табл. 2 [16].

Таблица 2 – Средняя растворимость хрома в меди в зависимости от температуры

Температура, °C	эв-текич.	1050	1000	950	900	800	600	500	400
Cr, % по массе	0,71	0,53	0,40	0,28	0,21	0,14	0,07	0,05	0,03

Таблица 3 – Химический состав хромовых бронз (массовая доля, %)

Марка	Cr	Zr	Ti	Cu	Другие элементы	Примеси, не более
БрХГ1	0,4...1,0	—	—	ост.	—	0,08 Fe; 0,3 Zn; сумма – 0,2
БрХ0,82	0,4...0,7	—	—	ост.	—	0,01 P; 0,06 Fe; 0,005 Pb; 0,05 Si; 0,015 Zn; сумма – 0,2
БрХНТ2	0,2...0,4	—	0,03... 0,08	ост.	0,5...0,8 Ni	0,01P; 0,06 Fe; 0,005 Pb; 0,05 Si; 0,015Zn; сумма – 0,2
БрХЦрТ2	0,25... 0,45	0,03... 0,07	0,04... 0,08	ост.	0,001 Mg	0,015 Fe; 0,003 Pb; 0,01 Si; 0,001 Zn; сумма – 0,2
БрХ1Цр2	0,4...1,0	0,03... 0,08	—	ост.	0,03 Ni	0,002 Bi; 0,003 Pb; 0,01 Zn; 0,01 Sn; 0,01As; сумма – 0,2
БрХВЦр21	0,35... 0,7	0,15... 0,30	—	ост.	0,15...0,4 V	0,01 P; 0,06 Fe; 0,005 Pb; 0,02 Si; 0,01 Zn; сумма – 0,2
БрХНб2	0,3...0,5	-	—	ост.	0,1...0,4 Nb	0,01 P; 0,06 Fe; 0,005Pb; 0,05 Si; 0,015 Zn; сумма – 0,2
БрХЦрК2	0,15... 0,25	0,15... 0,25	—	ост.	0,03...0,10 Ca	0,02 Fe; 0,005 Pb; 0,002 Sb; 0,005 Zn; 0,005 P; сумма – 0,2

1 химический состав приведен по ГОСТ 18175–78;

2 нормативно–техническим документом на химический состав являются ТУ. Примечание: примеси, не указанные в таблице, учитываются в общей сумме примесей.

Хром в медных сплавах оказывает большое влияние на механические и физические свойства меди. Он, в большой степени, упрочняет медь, повышает уровень ее жаропрочности и значительно увеличивает температуру рекристаллизации меди.

## 1.6 Термическая обработка хромовой бронзы

При разработке технологии термической обработки меди и ее сплавов приходится учитывать две особенности: высокую теплопроводность и активное взаимодействие меди с газами при нагреве. При нагреве тонких изделий и полуфабрикатов теплопроводность имеет второстепенное значение. При нагреве массивных изделий высокая теплопроводность меди является причиной более быстрого и равномерного их прогрева по всему сечению, по сравнению, например, с титановыми сплавами.

В связи с высокой теплопроводностью при упрочняющей термической обработке медных сплавов не возникает проблемы прокаливаемости. При используемых на практике габаритах полуфабрикатов и изделий они прокаливаются насквозь [20].

Медь и сплавы на ее основе активно взаимодействуют с кислородом и парами воды при повышенных температурах, по крайней мере, более интенсивно, чем алюминий и его сплавы. В связи с этим, при термической обработке полуфабрикатов и изделий из меди и ее сплавов часто применяют защитные атмосферы, в то время как в технологии термической обработки алюминия защитные атмосферы используют редко.

Основные виды термической обработки бронз – гомогенизация и промежуточный отжиг. Основная цель этих операций – облегчение обработки давлением. Гомогенизацию проводят при 700–750 °С с последующим быстрым охлаждением. Для снятия остаточных напряжений в отливках достаточно 1 ч отжига при 250 °С. Промежуточный отжиг при холодной обработке давлением проводят при температурах 550–700 °С. Отжиг меди и ее сплавов проводят с целью устранения тех отклонений от равновесной структуры, которые возникли в процессе затвердевания или в результате механического воздействия либо предшествующей термической обработки.

Гомогенизационный отжиг заключается в нагреве слитков до максимально возможной температуры, не вызывающей оплавления структурных составляющих сплавов.

Основными сплавами меди, нуждающимися в гомогенизационном отжиге, являются оловянные бронзы, так как составы жидкой и твердой фаз в системе Cu–Sn сильно отличаются, в связи с чем развивается интенсивная дендритная ликвация [21].

В результате гомогенизационного отжига повышается однородность структуры и химического состава слитков. Гомогенизационный отжиг – одно из условий получения качественного конечного продукта.

Рекристаллизационный отжиг – одна из распространенных технологических стадий производства полуфабрикатов меди и сплавов на ее основе. Температуру начала рекристаллизации меди интенсивно повышают такие элементы, как Zr, Cd, Sn, Sb, Cr, в то время как Ni, Zn, Fe, Co оказывают слабое влияние.

Качество отожженного материала определяется не только его механическими свойствами, но и величиной рекристаллизованного зерна. Величина зер-

на в полностью рекристаллизованной структуре довольно однородна. При неправильно установленных режимах рекристаллизационного отжига в структуре четко обнаруживаются две группы зерен различной величины. Эта так называемая двойная структура особенно нежелательна при операциях глубокой вытяжки,гиба или полировки и травления изделий.

Дисперсионно-твердеющие сплавы претерпевают фазовые превращения в твердом состоянии и подвергаются закалке без полиморфного превращения.

Закалка, или обработка на твердый раствор, преследует две цели: подготовить сплав к старению и добиться максимальной пластичности для дальнейшей деформации [2].

Температура нагрева под закалку должна обеспечивать как можно более полное растворение избыточных фаз в матричной фазе и находиться в двойной системе между линиями сольвуса и солидуса. Хотя процессы растворения избыточных фаз значительно ускоряются с повышением температуры, нагрев в непосредственной близости к линии солидуса технологически не рационален. В этом случае из-за возможного перепада температур в садке и неточности теплового контроля возникает опасность пережога изделия. Отсюда вытекает строгое требование контролировать температуру в закалочных печах с точностью  $\pm 10$  °С. Слишком высокие температуры нагрева под закалку могут привести также к росту зерна до недопустимых размеров.

Время выдержки определяется полнотой процессов растворения избыточных фаз. Чем дисперснее избыточная фаза, тем быстрее она растворяется. Деформированные сплавы выдерживают меньшее время, чем литые. Если избыточная фаза полностью не растворена, то получить оптимальные свойства после старения не представляется возможным. Длительные нагревы, помимо задолженности печей, приводят к росту зерна, сильному окалинообразованию и нежелательному увеличению диффузионной зоны, состоящей из окислов легирующего элемента.

Продолжительность выдержки деформированных полуфабрикатов и изделий из них при температурах нагрева под закалку, оцененная с учетом кинетики изотермического растворения избыточных фаз, невелика и составляет 10–15 с при 770–790 °С для бериллиевых бронз и 5 мин при 1030 °С для хромовых, циркониевых и хромциркониевых бронз. Основным лимитирующим фактором при нагреве под закалку – время прогрева полуфабрикатов до заданной температуры. Практически продолжительность нагрева выбирают из расчета примерно 1 ч на 25 мм сечения полуфабриката. Это время зависит от способа нагрева, атмосферы печи, геометрии полуфабриката и массы садки. Полосы и ленты толщиной более 2 мм обычно нагревают в садочных печах, ленты толщиной менее 2 мм – в протяжных.

Охлаждение при закалке должно быть достаточно резким, чтобы исключить распад пересыщенного матричного раствора в процессе охлаждения. Закалка в воде дает большие остаточные термические напряжения и вызывает поводку и коробление изделия. Поэтому при выборе закалочных сред следует учитывать критические скорости.

Качество закаленного металла контролируют металлографически либо по величине удельной электропроводности.

Второй этап термообработки – отпуск, обычно производится уже над изделием. Отпуск производится при «низкой температуре» в течение определенного времени. В процессе отпуска происходит выделение избыточной фазы с упорядоченным распределением легирующего элемента. Эти выделения связаны со значительными напряжениями кристаллической решетки, которые вызывают повышение прочности и твердости.

Для БрХ1 температура закалки 1030 °С, температура отпуска 400 °С в течение 4 часов [20].

Дополнительное повышение прочности медных сплавов и твердости можно получить холодной деформацией независимо от того, когда ее вести – между закалкой и старением или после них. В обоих случаях при одинаковой степени деформации достигаются одинаковые твердость и прочность. Деформация после старения не представляет затруднений, так как материал достаточно пластичен. При необходимости получения наибольшей электропроводности деформация между закалкой и старением более целесообразна.

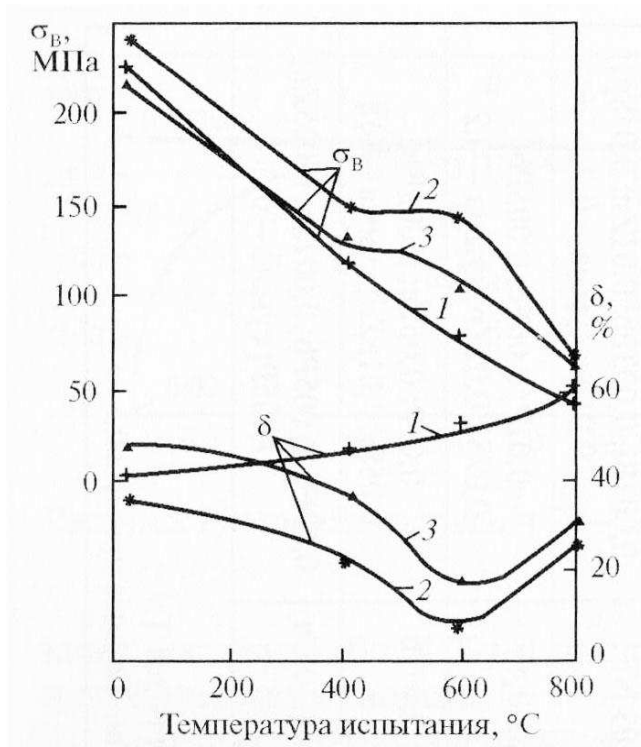
Эффект термообработки электрода контактной сварки из сплава БрХ1 представлен в табл. 4.

Таблица 4 – Зависимость свойств от термической обработки хромовой бронзы БрХ1

Свойства	После отжига	После закалки и старения
Модуль упругости E, МПа	11200	11500
Предел текучести, МПа	500	270
Предел прочности, МПа	240	410
Относительное удлинение	50	22
Твердость HV	65	130
Электрическое сопротивление	0,04	0,02

Минимальные значения временного сопротивления  $\sigma_b$  хромовая бронза имеет в отожженном состоянии, максимальные – в закаленном (рис. 10).





1 – отжиг при 700 °С , 2 ч;  
 2 – закалка с 1000 °С в воде;  
 3 – нормализация (охлаждение на воздухе) с 1000 °С

Рисунок 10 – Зависимость механических свойств бронзы БрХ (1% Cr) от температуры испытания после термической обработки по различным режимам.

Наибольшие различия в прочностных свойствах хромовых бронз между закаленным и нормализованным состояниями наблюдаются с температуры 400 °С, когда начинается распад пересыщенного хромом твердого раствора. Прочностные свойства хромовой бронзы в нормализованном и закаленном состоянии становятся практически одинаковыми при 800 °С. Двойные хромовые бронзы имеют область пониженной пластичности в температурном интервале 400–650 °С [21].

Сведения о физических, механических и технологических свойствах двойной хромовой бронзы БрХ1 даны в табл. 5.

Таблица 5 – Физические, механические и технологические свойства бронзы БрХ1

Физические свойства	
Температура плавления, °С:	
ликвидус	1081
солидус	1076
Плотность $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	8920
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>	17
Удельная теплоемкость $c_p$ Дж/(кг*К)	388
Удельное электросопротивление $\rho \cdot 10^6$ , Ом*м	
после закалки	0,0383
после старения	0,021
Удельная теплопроводность при 20 °С, $\lambda$ , Вт/(м*К):	
после закалки	167
после старения	315
Температурный коэффициент электрического сопротивления $\alpha'$ , К <sup>-1</sup> :	
после закалки	0,002
после старения	0,003
Модуль нормальной упругости (модуль Юнга) E, ГПа	131
Модуль упругости при сдвиге (модуль сдвига) G, ГПа	42
Механические свойства	
Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа:	
после закалки	240
после закалки и старения	410
после закалки, деформации и старения	520
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа:	
после закалки	65

после закалки и старения	270
после закалки, деформации и старения	440
Относительное удлинение $\delta, \%$	
после закалки	50
после закалки и старения	22
после закалки, деформации и старения	10
Твердость по Виккерсу HV:	
после закалки	65
после закалки и старения	130
после закалки, деформации и старения	150
Предел усталости при ( $3 \cdot 10^8$ циклов для бронзы с $\sigma_b=545$ МПа), $\sigma^{-1}$ , МПа	197
Технологические свойства	
Температура литья, °С	1250... 1350
Температура горячей деформации, °С:	750...950
Температура термической обработки, °С:	
отжига	650...700
закалки	980... 1000
старения	400...500
Суммарная степень деформации перед старением, %	50

В результате проведения анализа литературных данных, были поставлены вопросы о влиянии микроструктуры образцов хромовой бронзы, полученных по разным технологиям. Так как износ образцов, полученных методом литья и горячей штамповки, меньше, чем у электродов из сплава БрХ1, полученных литьем, то такое производство значительно снижает стоимость этих электродов, повышая экологичность безотходного производства. Так же можно сделать вывод о том, что электроды, полученные методом холодной деформации, невозможно получить сложной формы, что отрицательно скажется на экономическом факторе производства.

Было выявлено, что данная тема была изучена недостаточно, особенно это актуально для новых технологий получения электродов, методом литья совмещенного с горячей штамповкой.

## 2 Методики исследований

### 2.1 Приготовление микрошлифов

Исследование строения и пороков металла при больших увеличениях с помощью микроскопа (светового или электронного) на специально приготовленных образцах – микрошлифах называется микроскопическим, или микроструктурным, анализом (микроанализом), а изучаемое строение (структура) металла – микроструктурой. Микроанализ проводят с целью определения микроструктуры и фазового состава сталей и сплавов, оценки количества, размеров, формы и распределения различных фаз. Этот анализ позволяет установить связь химического состава, условий производства и обработки сплава с его микроструктурой и свойствами.

Применяемые в настоящее время световые микроскопы позволяют наблюдать и фотографировать структуру при увеличениях до 2500 раз, а электронные – до 1 000 000 раз.

Микроанализ включает три этапа:

- 1 приготовление микрошлифов – вырезка, шлифование и полирование;
- 2 травление шлифов – выявление структуры;
- 3 исследование микроструктуры под микроскопом до и после травления.

Микрошлифом называют небольшой образец металла, имеющий специально приготовленную поверхность для проведения микроанализа.

Хорошо приготовленный микрошлиф должен отвечать ряду требований:

- прежде всего, он должен быть представительным для структуры и свойств изучаемого объекта (детали);
- вырезка, шлифование и полирование образца должны осуществляться таким образом, чтобы на его поверхности оставался минимальный слой металла, деформированного шлифоприспособлением;
- на поверхности шлифа не должно быть царапин, рисок, ямок и загрязнений;
- в процессе приготовления шлифа не должно происходить выкрашивания неметаллических включений, карбидных и некоторых других фаз;
- поверхность шлифа должна быть плоской и гладкой для обеспечения исследования его при больших увеличениях.

Шлифование. После получения плоской поверхности образцы вручную шлифуют крупнозернистой шлифовальной шкуркой с постепенным переходом к мелкозернистой.

При ручном шлифовании шкурку помещают на плоское твердое основание (обычно толстое стекло). Образец прижимают шлифуемой поверхностью к шкурке и ритмично перемещают вперед и назад по прямой линии.

Шлифование следует осуществлять последовательным переходом от более крупнозернистой бумаги к бумаге с меньшей зернистостью. При переходе от одного номера бумаги к другому необходимо изменять положение образца относительно шлифовальной бумаги на 90 ° и шлифовать до тех пор, пока не исчезнут следы обработки от предшествующего номера бумаги. Чтобы избе-

жать попадания частиц более грубого абразива на бумагу следующего номера, образец необходимо каждый раз промывать водой. Не рекомендуется сильно прижимать образец к шлифовальной бумаге, так как это может привести к перегреву его поверхности и существенному изменению структуры поверхностного слоя. Чтобы образец не перегревался, его периодически охлаждают в воде. Заключительная операция подготовки поверхности микрошлифа – полирование не должна занимать более 3–4 мин.

Полирование служит для удаления мелких рисок, оставшихся после шлифования, и получения гладкой зеркальной поверхности шлифа.

Полирование осуществляется вручную (рис. 11). Применяют механический, электрохимический и химико-механический методы полирования.

При ручном полировании образец непрерывно перемещают от центра к периферии (рис. 11), что обеспечивает равномерное распределение абразива и однородный износ полировального материала. Кроме того, образец периодически вращают или перемещают «восьмеркой», чтобы исключить образование «хвостов» около неметаллических включений и частиц выделившихся фаз.



Рисунок 11 – Однодисковый станок для ручной полировки

Важное условие получения качественных шлифов – тщательное соблюдение чистоты при полировании. После каждой операции приготовления шлифа образец необходимо хорошо промыть под струей воды, чтобы исключить загрязнение полировального круга абразивными частицами и продуктами резания, внесенными с предыдущих операций. Если в образце имеются мелкие поры и трещины, а также, если для полирования используются алмазные пасты, желательно применять ультразвуковую очистку.

Для выявления полной микроструктуры поверхность шлифа подвергают травлению, т. е. воздействию химически активных растворов щелочей, солей, кислот в спирте или воде. Конкретный химический реактив для травления выбирают, исходя из состава исследуемого металла, его предшествующей обработки и цели исследования. В процессе травления реактив неодинаково взаимодействует с различными участками поверхности микрошлифа, что приводит к разной степени их травимости.

Принцип травления многофазных сплавов заключается в избирательном растворении либо окраске одной или нескольких фаз благодаря разнице в химическом составе и в меньшей степени – различной ориентации структурных составляющих. Однако в чистых металлах или однофазных сплавах избирательное растворение является, по существу, результатом различной ориентации зерен, так как в плоскость микрошлифа попадают разные кристаллографические плоскости.

Таким образом, в результате неодинакового травления границ зерен, фазовых и структурных составляющих на поверхности шлифа появляется микрорельеф.

В табл. 6 представлены самые распространенные реактивы для травления меди и сплавов на ее основе.

Таблица 6 – Реактивы для травления меди и ее сплавов

Медь и ее сплавы	10%-ный водный раствор персульфата аммония	Травить в течение 1–2 мин. Перед использованием добавить пару капель аммиака
Бронзы и латуни	10 мл 2,5%-ного водного раствора персульфата аммония, 10 мл 25%-ного аммиака	Травить погружением на время от 3 с до 1,5–2 мин для двухфазных бронз и латуней
Медь, никель, молибден и их сплавы	1–2 мл серной кислоты, 10 мл 1%-ного водного раствора перманганата калия	Применять свежеприготовленным, однократно. Травить погружением или протираанием в течение 0,5–1,5 мин
Медь, латунь, бронзы	10–50%-ный водный раствор азотной кислоты	Продолжительность травления от 2–5 с до 1–2 мин в зависимости от концентрации раствора

## 2.2 Исследование микроструктуры

Исследование микроструктуры проводится путем визуального наблюдения и фотографирования микроструктуры непрозрачных объектов в отраженном свете на металлографическом микроскопе, при различных увеличениях. Одним из таких микроскопов является *Carl Zeiss Axio Observer Z1m* (рис. 12) оборудованный специальным устройством цифровой визуализации изображений *AxioCam MRc5* для фотосъемки [22].



Рисунок 12 – Общий вид микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*

Технические характеристики микроскопа представлены в (табл.7).

Таблица 7 – Технические характеристики микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*

Увеличение микроскопа	50x – 1000x (без конфокальных лазерных приставок и модулей <i>Optovar</i> )
Увеличение объективов	5x, 10x, 20x, 50x, 100x (опционально длиннофокусные, флуоресцентные, изолированные, мультииммерсионные)
Увеличение окуляров и поле зрения	<i>W-PL</i> 10x/23 мм (опционально <i>E-PL</i> 10x/25 мм)
Револьвер для крепления объективов	6-и позиционный
Револьвер для смены рефлекторов	6-и позиционный быстросъемный

Осветитель штатный	<i>HAL 12В/100Вт</i>
Осветитель (опционально) с внешним БП	<i>XBO 75Вт</i> (ксенон); <i>HBO 12В/100Вт</i> (ртуть); <i>LED</i> (сведиодный)
Ручной предметный стол с соосными ручками	двухкоординатный 130x85мм двухкоординатный поворотный 20x20мм/90о
Моторизованный предметный стол	двухкоординатный 120x100мм <i>STEP</i> двухкоординатный 130x85мм <i>CAN</i>
Доступные методы контраста	Светлое поле, тёмное поле, поляризация, ДИК, круговой ДИК, флуоресценция
Видео/Фото выход	переднее/верхнее/левое/правое расположение (требуется оптический адаптер)
Габаритные размеры ГxВxШ, мм	831(включая <i>HAL 100</i> ) x 425 (без штатива на просвет) x294(386 для <i>Z1m</i> )
Масса, кг	36( <i>Z1m</i> )

С 2007 года фирма *Carl Zeiss* выпускает новую серию инвертированных металлографических микроскопов *Axio Observer A1m/D1m/Z1m*. Эта серия является логическим продолжением развития параметрического ряда  $IC^2S$ -оптики, отличительной особенностью которой является разработка осветительной системы с апохроматическим коллектором, обеспечивающим высокое качество светового потока, падающего на поверхность объекта и обеспечивающего точное воспроизведение его в изображении не только за счёт качественной оптики объектива, но и за счёт светового потока, формирующего изображение.

Инвертированный микроскоп *Axio Observer* имеет моторизованное исполнение. Отличительной особенностью новых микроскопов является их модульность в широком диапазоне, начиная с возможности реализации его как микроскопа отражённого, так и проходящего света с соответствующим комплектом конденсоров и объективов проходящего света. Интерес представляет введённый в данную серию комплект осветителей. Наравне с галогенной и ртутной лампами, предлагаются светодиодные осветители для проходящего света, известные своей долговечностью. Адаптер для установки двух осветителей (например, с галогенной и ртутной или ксеноновой лампами одновременно) позволяет проводить исследования различными источниками света без остановки в процессе работы.

Два типа моторизованных столов разной точности (а значит и разной стоимости) обеспечивают процесс автоматизированного контроля не только по площади, но и при использовании специального адаптера, автоматизировать также процесс измерения и наблюдения по оси  $z$ .

Все инвертированные металлографические микроскопы фирмы *Carl Zeiss* реализуют такие методы контрастирования и исследования как светлое и тёмное поле, поляризация, люминесценция и дифференциально-интерференционный контраст (*DIC, PlasDIC*), фазовый анализ. Измерения мо-



гут быть проведены как с помощью электронного цифрового окулярного микроскопа (окуляр 20х), так и с помощью мини-интерферометра *ТИС*.

Способ растровой (или сканирующей) микроскопии в настоящее время приобрел очень широкое распространение. Исследование осуществляется на растровом электронном микроскопе (РЭМ), одним из таких микроскопов является РЭМ *НИТАСНИ TM1000* (рис. 13) [23].

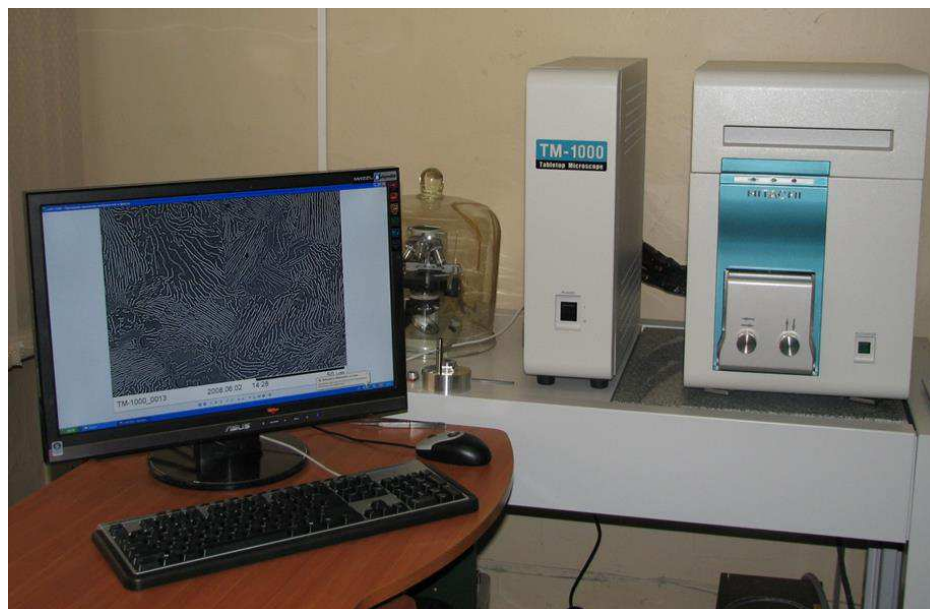


Рисунок 13 – Общий вид микроскопа *НИТАСНИ TM1000*

РЭМ *НИТАСНИ TM1000* предназначен для исследования изломов и микроструктуры материалов различного назначения, позволяет выяснять особенности деформации и разрушения материалов, определить тип и найти очаг разрушения, проследить стадии разрушения.

Микроскоп состоит из 3-х блоков – собственно микроскопа с вакуумной системой, состоящей из насоса с диафрагмой, обеспечивающего низкий вакуум, и турбомолекулярного насоса – для получения высокого вакуума, блока питания, и управляющего компьютера. Высоковакуумный турбомолекулярный насос поддерживает высокий вакуум ( $\sim 10^{-5}$  Па) в верхней части колонны микроскопа – пушке, в которой расположен вольфрамовый катод.

Формирование изображения происходит следующим образом. На пушку подается ускоряющее напряжение, под действием которого катод начинает эмитировать электроны. Электронный пучок, формируемый электромагнитными линзами в тонкий зонд, взаимодействует с поверхностью образца. Вторичные и отраженные электроны фиксируются твердотельным детектором, на экране монитора за счет фазового и топографического контраста формируется изображение. Изображение сохраняется в файл с расширением *.bmp*, *.jpg*, *.gif*.

Управление микроскопом, получение изображения, визуализация производятся персональным компьютером со специальным программным обеспечением (рис. 14) [23].



Рисунок 14 – Окно управляющей программы РЭМ *HITACHI TM1000*  
 Технические характеристики микроскопа представлены в (табл.8).

Таблица 8 – Технические характеристики микроскопа *HITACHI TM1000*

Ускоряющее напряжение	15 кВ (неизменное)
Степень увеличения	От 20 до 10 000 (настройка степени увеличения изображения в 32 этапа*; Максимальная просматриваемая область: 3,5 мм (квадратная)
Степень разрежения в электронной пушке	Свыше $5 \times 10^{-2}$ Па
Степень разрежения в камере для образца	Около 30–50 Па; изменение от 1 до 15 Па (без регулирования степени разрежения)
Размер образца	70 мм (диаметр)
Толщина образца	Менее 20 мм
Диапазон перемещений столика	По оси X: 15 мм; по оси Y: 18 мм (перемещение только по осям X и Y)
Диаметр диафрагмы	Конденсорной линзы: диаметр 1,0; Лизы объектива: диаметр 0,1
Конденсорная линза и линза объектива	Постоянный магнит + электромагнит
Настройка фокуса	Настройка электромагнитной линзы объектива
Подстройка осевого положения электронного луча	Механическая юстировка электронной пушки
Детектор	Высокочувствительный полупроводниковый де-

	тектор обратно рассеянных электронов
Способ управления	С помощью портативной вычислительной машины (специализированного микрокомпьютера)
Размер запоминаемого кадра	1280 x 960, 640 x 480 элементов изображения (только изображение)
Данные, показываемые на экране	Маркер размера в микронах, размер в микронах, дата и время, номер изображения, комментарии
Вакуумная система	Диафрагменный насос: 1 м <sup>3</sup> /час Турбомолекулярный насос: 30 л/сек
Требования к электропитанию	~ 100 В, одна фаза, 50 Гц, 500 В

Энергодисперсионный анализ выполняли на растровом электронном микроскопе *JEOL JSM-7001F* (рис. 15) [24].



Рисунок 15 – Общий вид микроскопа *JEOL JSM-7001F*

Технические характеристики:

- термополевой источник электронов;
- ускоряющее напряжение от 0.5 до 30 кВ;
- разрешение (изображение во вторичных электронах) до 1.2 нм (при ускоряющем 30 кВ);
- увеличение: от x 10 до x 1 000 000;
- виды контраста (вторичные и отраженные электроны): топографический, композиционный;
- элементный анализ: от В до U

Перед исследованием образцов их промывали в ультразвуковой мойке *BRANSON 3510* (рис. 16)



Рисунок 16 – Ультразвуковая мойка *BRANSON 3510*

Технические характеристики:

- объем – 5 л;
- вес 5 кг;
- размеры:
  - наружные 399x370x310;
  - внутренние 290x150x150;
- частота 40 кГц;
- потребляемая мощность 130 Вт;
- подключение 220 В;
- потребляемая мощность при нагреве – 335 Вт.

### **2.3 Измерение твердости и микротвердости**

Испытание на микротвердость применяется при определении твердости отдельных фаз и структур сплава, мелких деталей приборов, тонких полуфабрикатов (лент, фольги, проволоки), тонких слоев, получающихся в результате химико-термической обработки (цементация, азотирование, цианирование и др.), поверхностных слоев металла, изменивших свои свойства в результате снятия стружки, давления, трения. Микротвердость определяют вдавливанием алмазной пирамиды. Для испытания на микротвердость применяют прибор ПМТ-3 (рис. 17) [26]. Технические характеристики микротвердомера представлены в табл. 9 [25].



Рисунок 17 – Прибор для измерения микротвердости ПМТ–3

Таблица 9 – Технические характеристики микротвердомера ПМТ–3

Диапазон нагрузки, Н	От 0,0196 до 4,9
Диапазон нагрузки, КГС	От 0,002 до 0,500
Увеличение микроскопа микротвердомера	130, 500, 800
Габаритные размеры, мм (не более)	270x290x470
Масса, кг (не более)	22

Измерение микротвердости проводится согласно ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» [27].

Твердость измерялась на приборе (рис. 18), в нижней части неподвижной станины которого установлен столик. В верхней части станины укреплены индикатор, масляный регулятор и шток, в котором устанавливается наконечник со стальным шариком диаметром 1,588 мм.

Индикатор представляет собой циферблат, на котором нанесены две шкалы (черная и красная) и имеются две стрелки – большая (указатель твердости), вращающаяся по шкале, и маленькая для контроля величины предварительного нагружения, сообщаемого вращением маховика.



Рисунок 18 – Прибор для измерения твердости по Роквеллу

Вдавливание производится в два этапа – сначала прилагается предварительная нагрузка  $P_0 = 980 \text{ Н}$  (10 кг), а затем основная  $P_1$ . Таким образом общая нагрузка будет равна их сумме  $P = P_0 + P_1$ . Предварительная нагрузка необходима для того, чтобы исключить влияние упругой деформации и различной степени шероховатости поверхности образца.

Твёрдость по Роквеллу измеряется в условных единицах. За единицу твёрдости принята величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм. В табл. 10 приведены условия, которые необходимо соблюдать при измерении твёрдости этим методом. Расстояние между центрами соседних отпечатков или расстояние от центра какого-либо отпечатка до края образца должно быть не менее 3,0 мм.

Измерение твердости проводится согласно ГОСТ 9013–59 (ИСО 6508–86) Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу [28].

Таблица 10 – Условия измерения твёрдости по методу Роквелла

Обозначения		Формула для выражения чисел твёрдости	Р1 МПа (кГ)	Р МПа (кГ)	Пределы измерения чисел твёрдости по Роквеллу HR	Тип нако- нечника
Шкалы	Чисел твёрдости					
В	HRВ	$130 - e$	882 (90)	980 (100)	25–100	Стальной шарик диаметром 1,588 мм

#### 2.4 Измерение электрического сопротивления

Для измерения электросопротивления применяли микроомметр Ф4104–М1 – прибор с высокой степенью точности (рис. 19).

Принцип действия микроомметра основан на измерении величины падения напряжения на измеряемом сопротивлении при прохождении через него тока заданной величины. Для измерения производится настройка прибора: установка 0, калибровка и предел измерения:  $10^{-2}$  мОм. Далее узлы устанавливаются на исследуемые детали, так чтобы они располагались максимально близко друг к другу и параллельны оси измерения, так чтобы через все четыре контакта можно было провести прямую линию. После измерения результаты сравнили с результатами, полученными на образцах основного металла.

При измерении на диапазонах 0–100 мкОм, 0–1 мОм, 0–10 мОм, 0–100 мОм, 0–1 Ом, 0–10 Ом в качестве оперативного тока используется стабилизированный по амплитуде одиночный импульс, на остальных диапазонах – стабилизированный постоянный ток [29].



Рисунок 19 – Микроомметр Ф4104–М1

Микроомметр Ф4104–М1 состоит из блока питания, стабилизатора тока, измерительного усилителя с фильтром и генератора синхронизирующих импульсов. При питании прибора от сети входное напряжение понижается до 12–16 В и выпрямляется. Преобразователь напряжения выполнен на транзисторах по схеме с самовозбуждением и стабилизацией выходного напряжения. К выходным клеммам подключается измеряемое сопротивление.

Падение напряжения с измеряемого сопротивления поступает на вход измерительного усилителя, выполненного на операционных усилителях. Ток, протекающий через измеряемое сопротивление постоянный, поэтому падение напряжения на измеряемом сопротивлении прямо пропорционально величине измеряемого сопротивления. Для запоминания амплитуды одиночного импульса, когда в качестве оперативного тока используется одиночный импульс, служит запоминающая емкость, которая коммутируется электронным ключом.

Калибровка измерительного усилителя микроомметра Ф4104–М1 осуществляется при помощи переменного резистора КЛБ, при этом на измерительный усилитель поступает сигнал с образцовых резисторов.

Технические характеристики микроомметром Ф4104–М1:

Пределы допускаемых значений основной погрешности от конечного значения диапазона измерений:

- 4 % на диапазоне 1–100 мкОм.
- 2.5% на диапазоне 0–1 мОм, 0–10 мОм, 0–100 мОм, 0–1 Ом.
- 1.5% на остальных диапазонах.

Диапазон измерений микроомметра Ф4104 – от 0–100 мкОм до 0–10МОм (12 диапазонов).

Класс точности 1,5; 2,5 и 4 (в зависимости от диапазона измерения).



### 3 Исследовательская часть

#### 3.1 Микроструктура сплава БрХ1

На рисунках 20–24 приведены микроструктуры хромистой бронзы марки БрХ1, которая была получена разными способами.

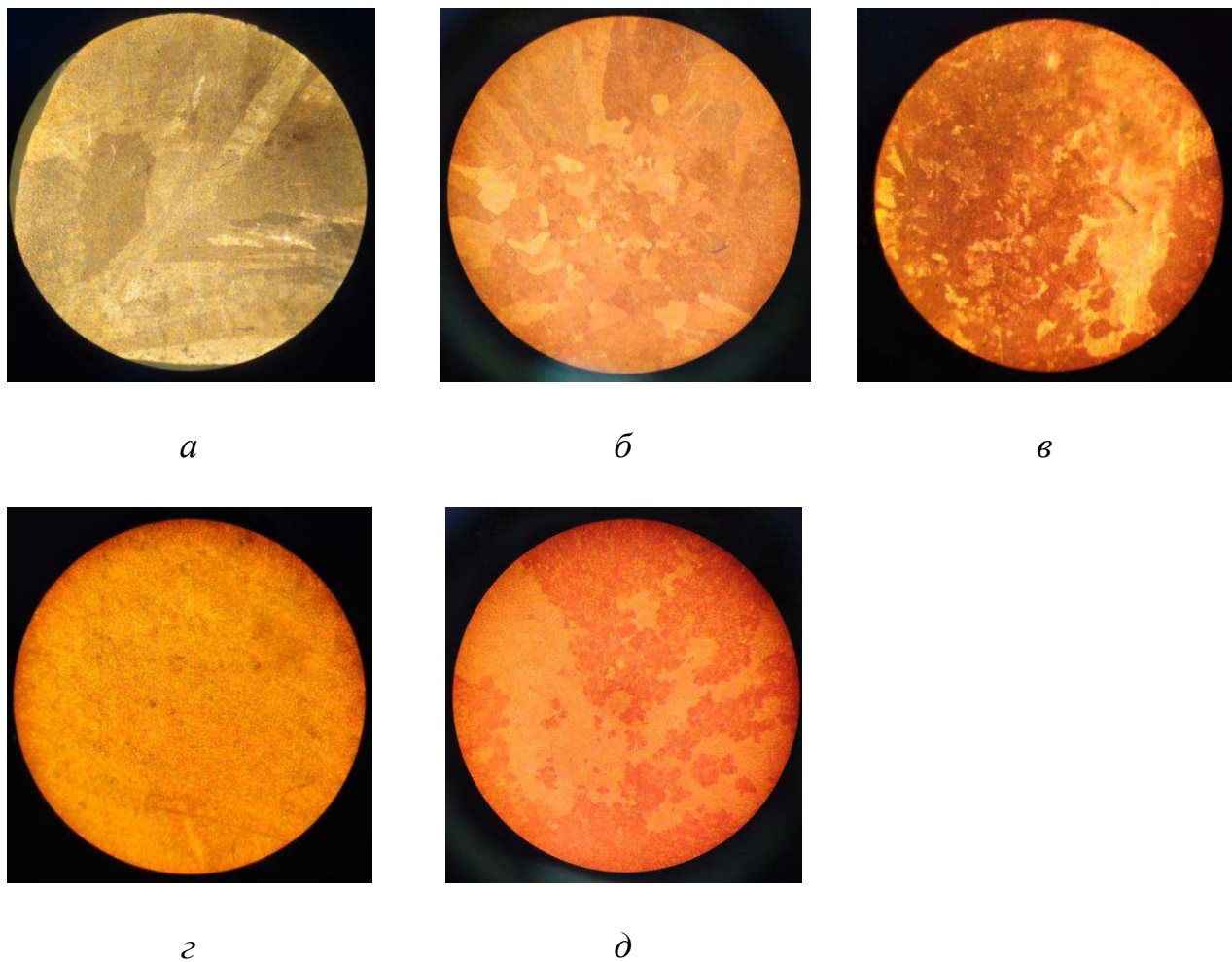
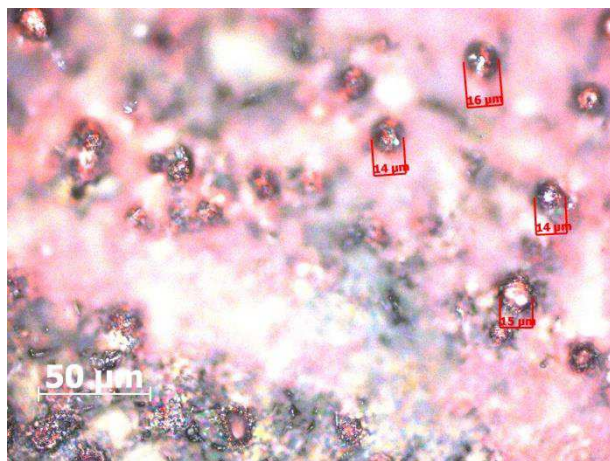
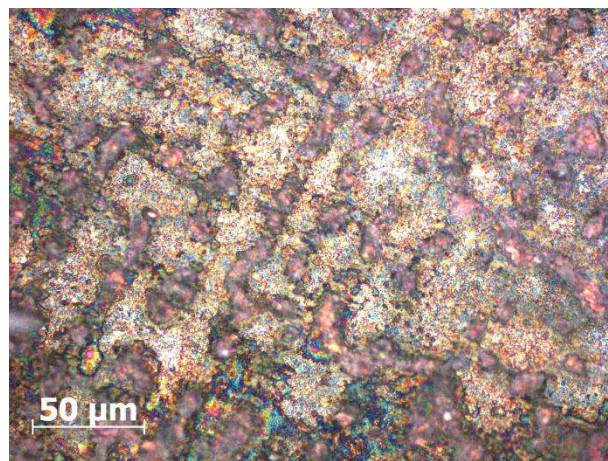


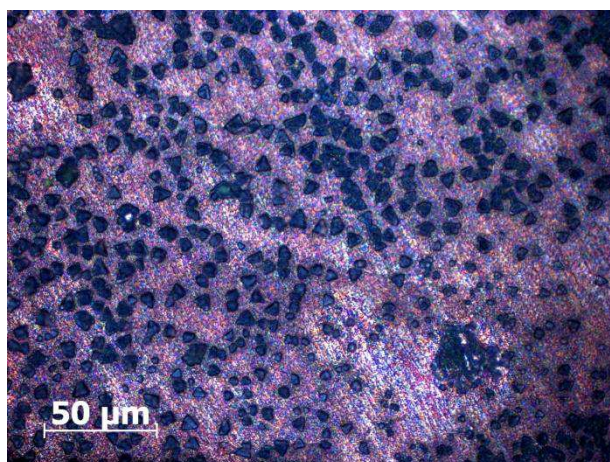
Рисунок 20 – Микроструктура сплава БрХ1 (МБС–1) полученного:  
*a* – литьем; *б* – литьем и горячей штамповкой; *в* – отжигом 700–750 °С;  
*г* – отжигом и холодной пластической деформацией; *д* – из прутка БрХ1



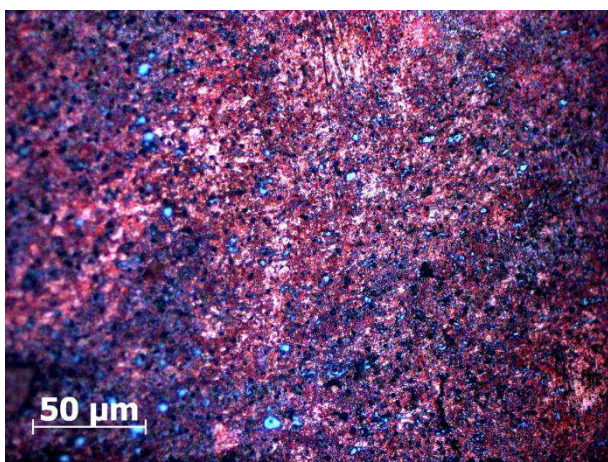
*a*



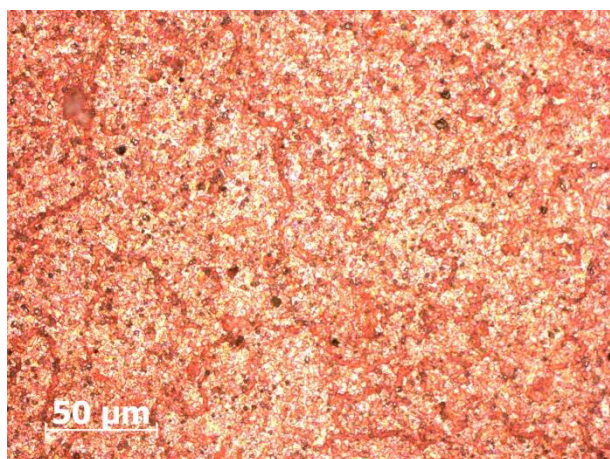
*б*



*в*



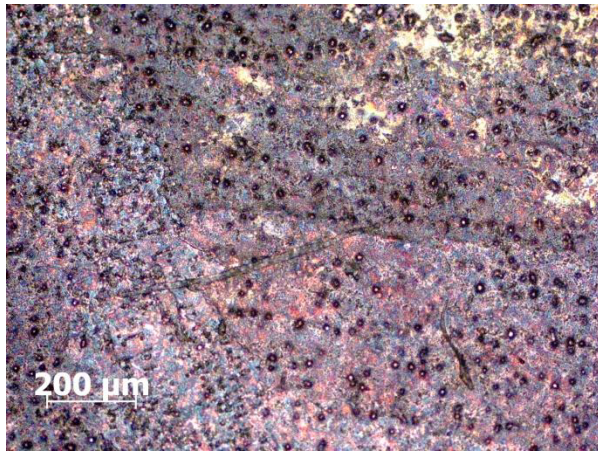
*г*



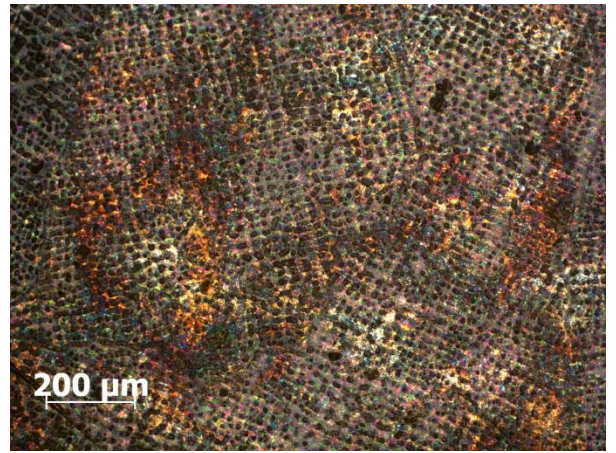
*д*

Рисунок 21 – Микроструктура сплава БрХ1  
(Carl Zeiss Axio Observer Z1m 50 мкм) полученного:

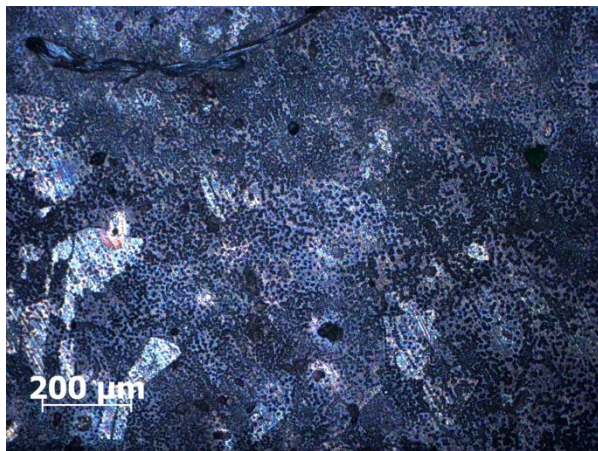
*a* – литьем; *б* – литьем и горячей штамповкой; *в* – отжигом 700–750 °С ;  
*г* – отжигом и холодной пластической деформацией; *д* – из прутка БрХ1



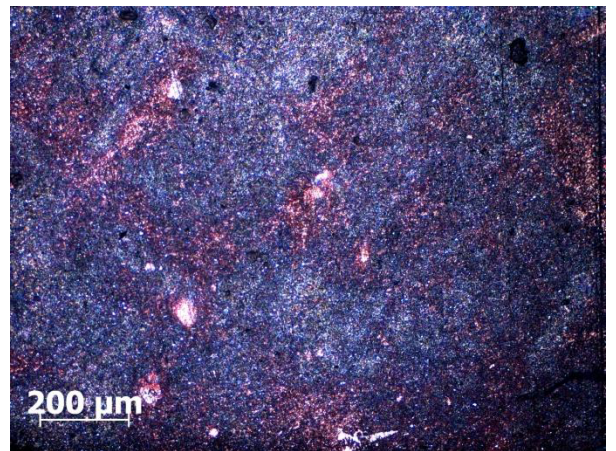
*a*



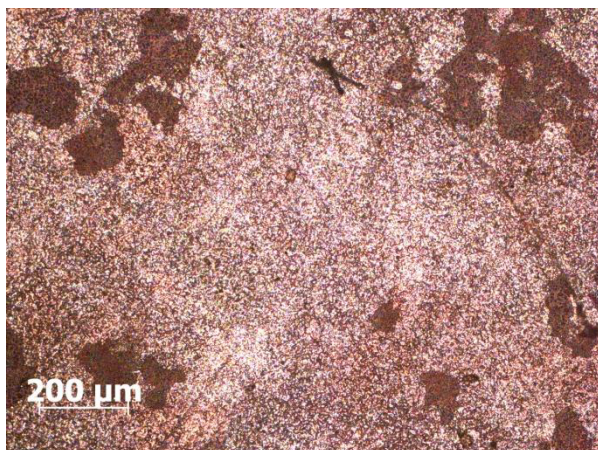
*б*



*в*



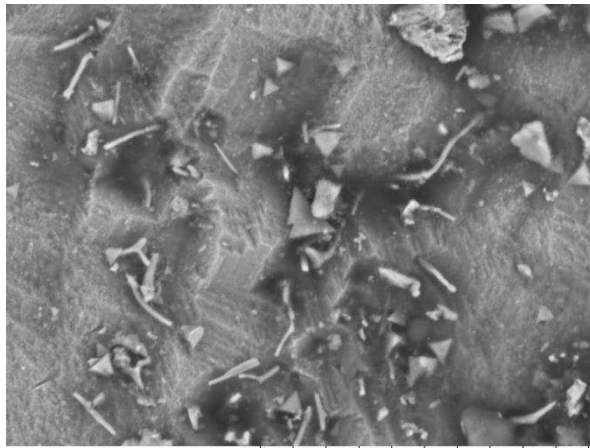
*г*



*д*

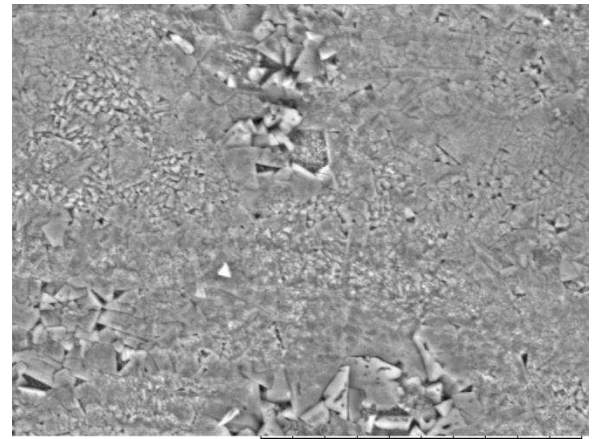
Рисунок 22 – Микроструктура сплава БрХ1  
(*Carl Zeiss Axio Observer Z1m* 200 мкм) полученного:

*a* – литьем; *б* – литьем и горячей штамповкой; *в* – отжигом 700–750 °С ;  
*г* – отжигом и холодной пластической деформацией; *д* – из прутка БрХ1



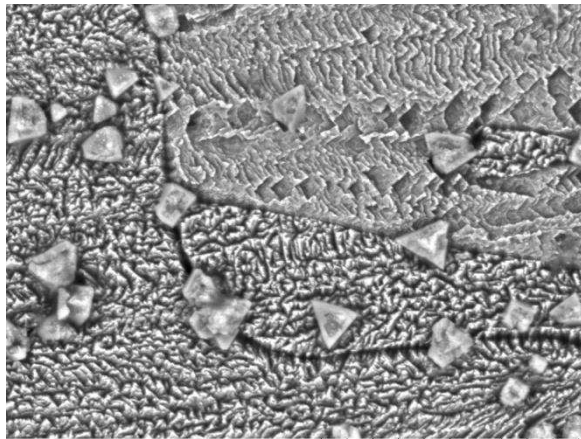
TM-1000\_ x5,0k 20 um

*a*



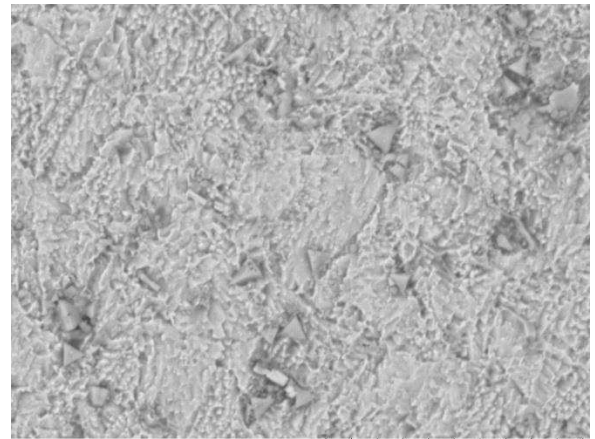
TM-1000\_ x5,0k 20 um

*б*



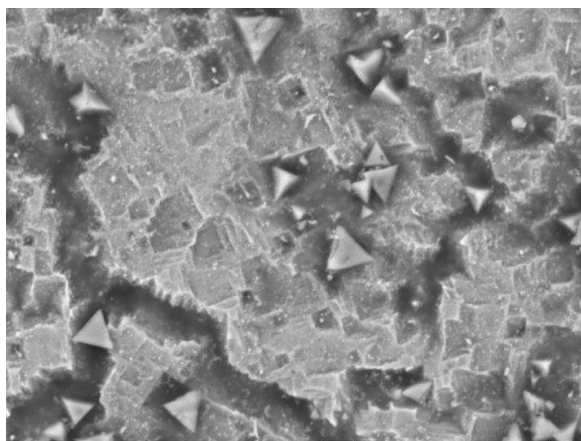
TM-1000\_ x4,0k 20 um

*в*



TM-1000\_ x4,0k 20 um

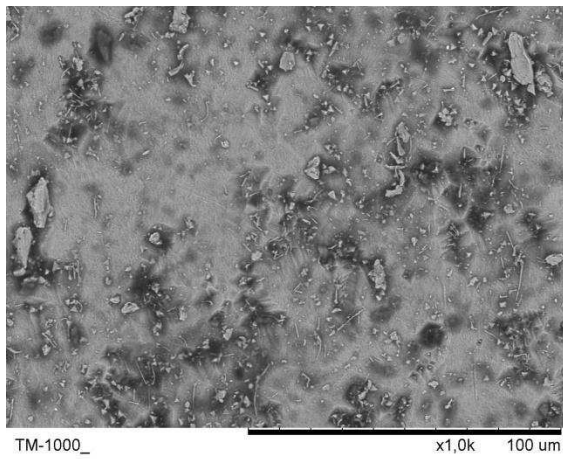
*г*



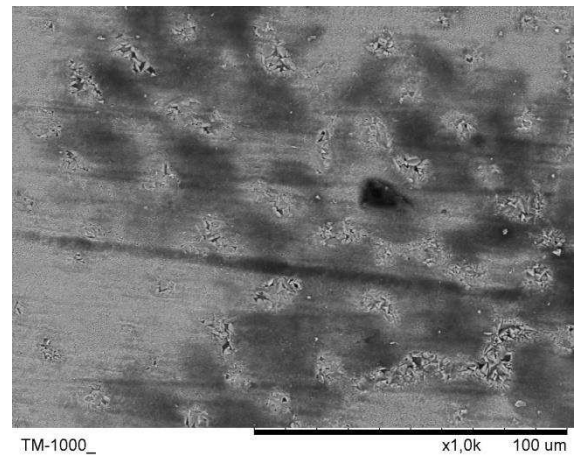
TM-1000\_ x5,0k 20 um

*д*

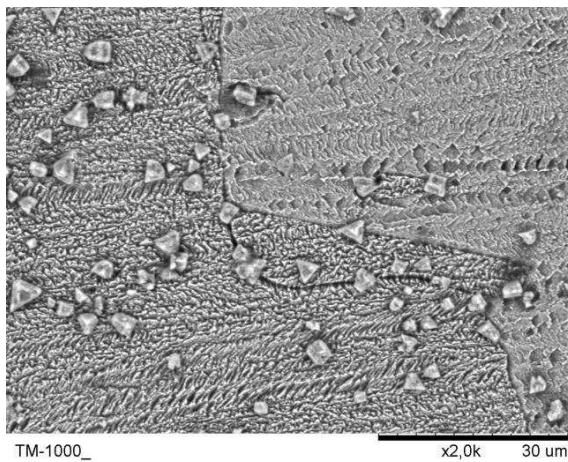
Рисунок 23 – Микроструктура сплава БрХ1  
(НИТАСНІ ТМ1000 при увеличении  $\times 4000$ – $5000$ ) полученного:  
*a* – литьем; *б* – литьем и горячей штамповкой; *в* – отжигом  $700$ – $750$  °С ;  
*г* – отжигом и холодной пластической деформацией; *д* – из прутка БрХ1



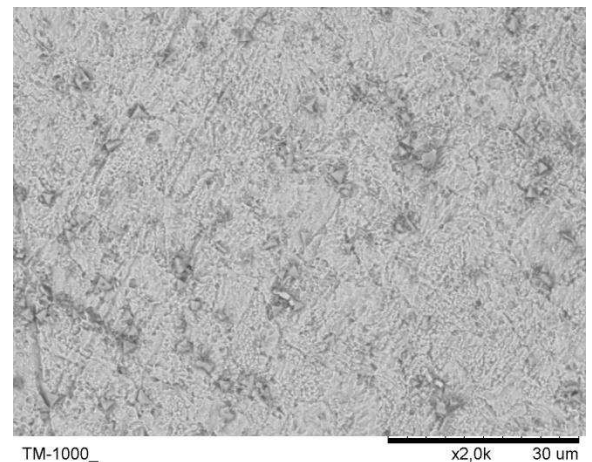
*a*



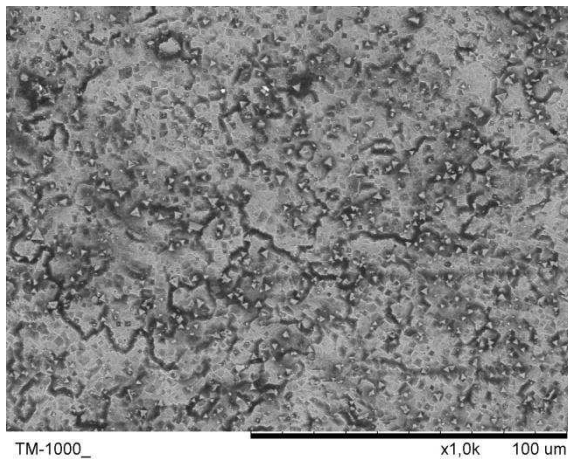
*б*



*в*



*г*



*д*

Рисунок 24 – Микроструктура сплава БрХ1  
(*HITACHI TM1000* при увеличении  $\times 1000$ – $2000$ ) полученного:  
*a* – литьем; *б* – литьем и горячей штамповкой; *в* – отжигом  $700$ – $750$  °С ;  
*г* – отжигом и холодной пластической деформацией; *д* – из прутка БрХ1

В литом образце (рис. 20, а – 24, а) видны крупные равноосные зерна  $\alpha$ -твердого раствора с мелкими дисперсными выделениями окислов. На рис. 20, б – 24, б следует отметить достаточно равномерное распределение вторичной фазы в объеме электрода. Это свидетельствует об интенсивном перемешивании расплава в процессе индукционной плавки сплава. Отчетливо видны границы зерен в микроструктуре образца, представленного на рис. 20, в – 24, в, отжиг при температуре 700–750 °С устранил неоднородность структуры. Отжиг и пластическая деформация (рис. 20, г – 24, г) повлияли на укрупнение структуры  $\alpha$ -твердого раствора и способствовали устранению окислов. После протяжки из прутка (рис. 20, д – 24, д) обнаруживаются вытянутые зерна, на границе которых видны скопления окислов.

Энергодисперсионный анализ электрода, полученного методом литья и горячей штамповки, выполняли на растровом электронном микроскопе *JEOL JSM-7001F* [24]. Суммарная площадь исследования составила около 5 мм<sup>2</sup> и показывает примерное содержание основных элементов в сплаве (табл. 11, 12). Электронно-микроскопическое изображение микроструктуры сплава БрХ1, полученного способом литья и горячей штамповки представлено на рис. 25–27.



Рисунок 25 – Электронно-микроскопическое изображение микроструктуры сплава БрХ1 (x6000)

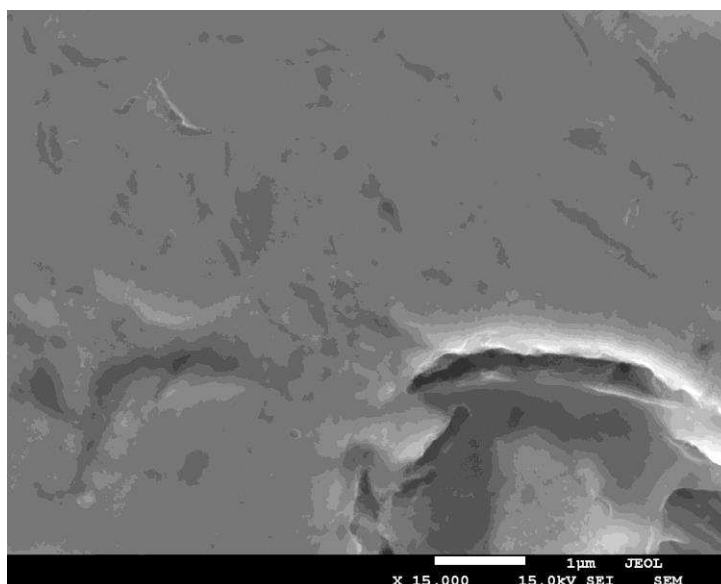


Рисунок 26 – Электронно-микроскопическое изображение микроструктуры сплава БрХ1 (x15000)

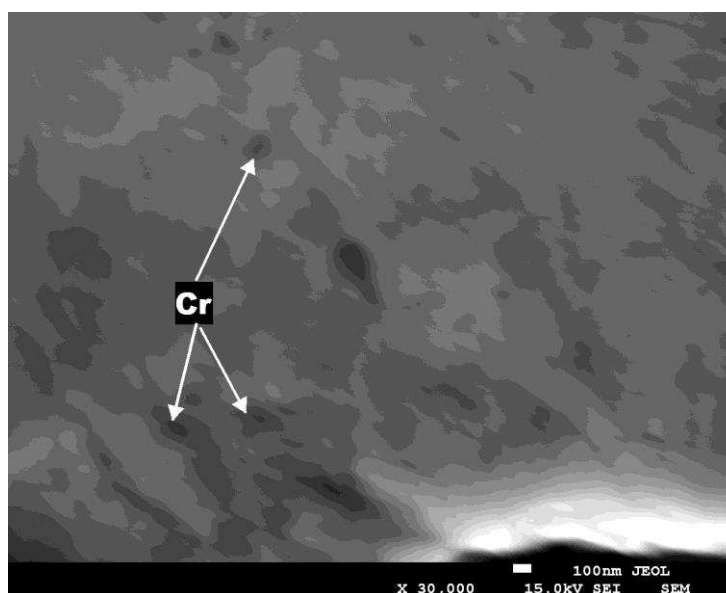
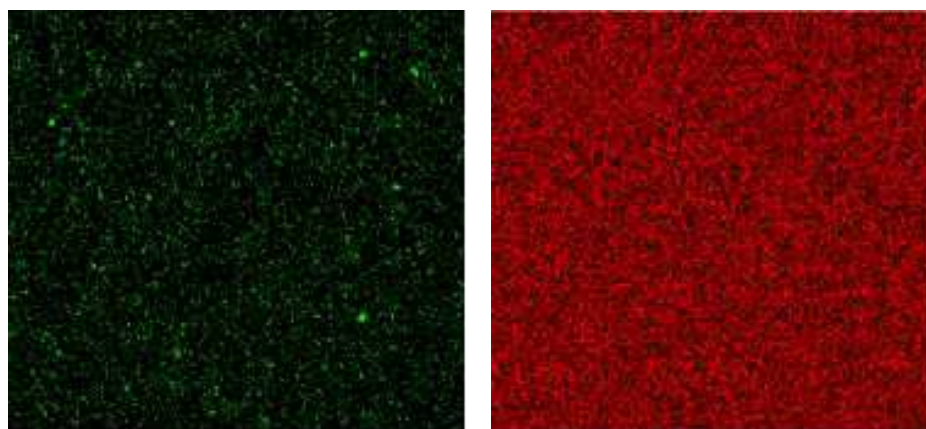


Рисунок 27 – Электронно-микроскопическое изображение микроструктуры сплава БрХ1 (x30000)

Распределение химических элементов в характеристическом излучении по площади шлифа (рис. 28) достаточно равномерное, что положительно отражается на твердости и электропроводности образцов.

Таблица 11 – Содержание химических элементов в спектре, %

Cr	P	Cu	Total
1,01	0,12	98,87	100



*a*

*б*

Рисунок 28 – Карты химических элементов в характеристическом излучении (x3000):  
*a* – Cr (хром); *б* – Cu (медь)

В результате электронно-микроскопического анализа было выявлено, что хром в структуре образцов, полученных литьем и горячей штамповкой, наблюдается только при увеличении x30000. Именно для этого увеличения и был проведен энергодисперсионный анализ образцов (рис. 29).

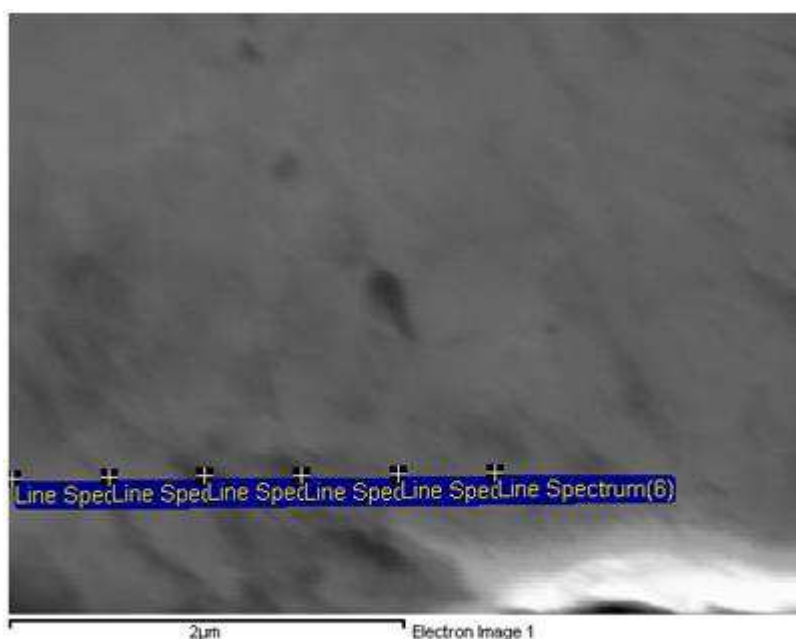


Рисунок 29 – Изображение структуры с маркерами линейного спектра, x30000, шаг 0,5 мкм

По данным полученным по результатам энергодисперсионного анализа (табл. 12) были построены концентрационные кривые распределения химических элементов (рис. 30).



Таблица 12 – Элементный состав линейного спектра, вес. %

Spectrum	Cr	Cu	Total
Line Spectrum(1)		100,00	100,00
Line Spectrum(2)	0,57	99,43	100,00
Line Spectrum(3)	0,61	99,39	100,00
Line Spectrum(4)	23,88	76,12	100,00
Line Spectrum(5)	13,27	86,73	100,00
Line Spectrum(6)	0,66	99,34	100,00

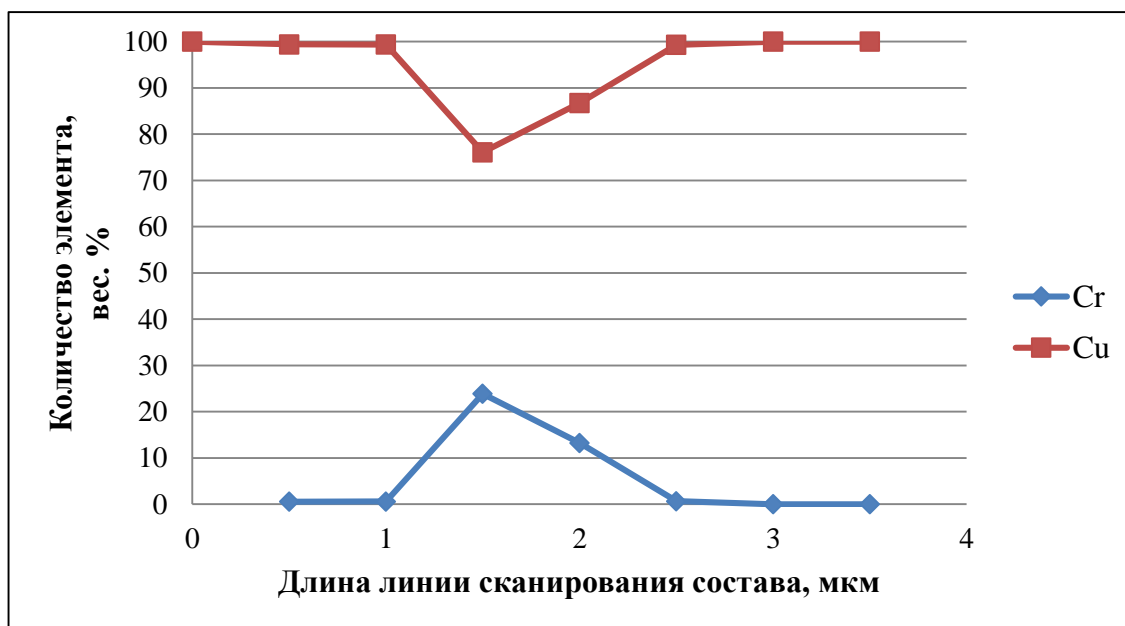


Рисунок 30 – Концентрационные кривые распределения химических элементов

Анализируя график изменения химического состава можно сделать вывод о наличии мелких дисперсных включений хрома в меди, которые, не растворяясь, способствуют повышению твердости и электропроводности электродов.

### 3.2 Испытание оценки работоспособности электродов

Чтобы исключить влияние как можно большего количества факторов и обеспечить требуемую объективность оценки работоспособности электродов, испытания проводили на одной сварочной машине, сваривая материал одной марки, разной толщины и качества поверхности, задаваясь при этом вполне определенными параметрами сварки (температура сварки, энергетические параметры, давление на электроды, условия охлаждения) [16].

Испытание проводили на контактной машине МПТУ–300. Сваривали вкрест [30] стержни арматуры диаметрами 10+40 мм из стали 35ГС. Схема крестового соединения стержней арматуры представлена на рис. 31, а процесс сварки на рис. 32.

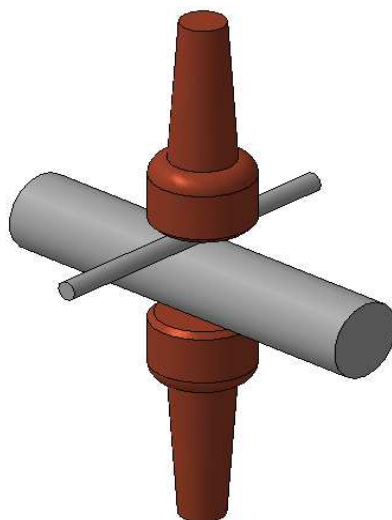


Рисунок 31 – Схема крестового соединения стержней



Рисунок 32 – Процесс сварки арматуры вкрест

В процессе сварки двух стержней арматуры из стали 35ГС диаметрами 10+40 мм вкрест были подобраны оптимальные режимы, приведенные в табл. 13.

Таблица 13 – Оптимальные режимы сварки электродов

Усилие на электродах, кг	Сварочный ток, кА	Темп сварки, т/мин	Время сварки, с	Длительность выдержки под током, с
580	23,6	30	0,25–0,72	0,47

Испытания проводили до полного износа электродов (рис. 33).



Рисунок 33 – Износ электродов контактной сварки

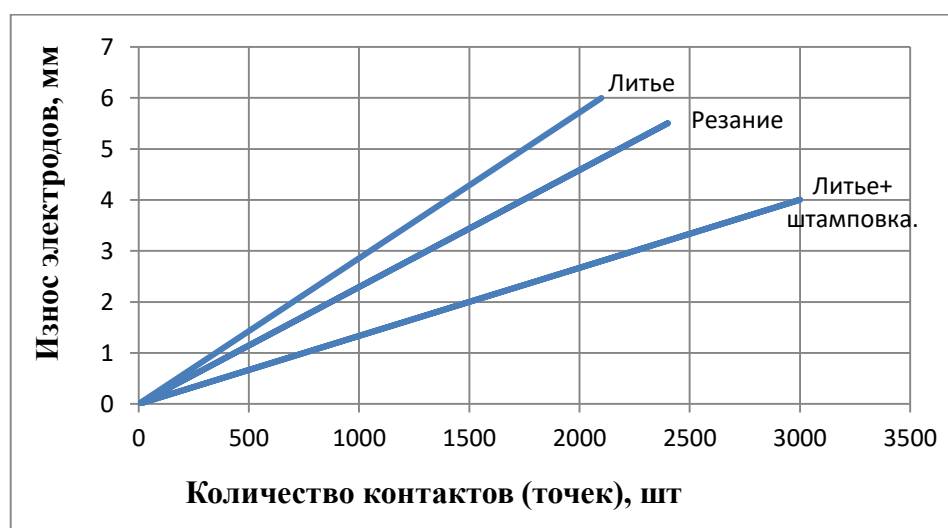


Рисунок 34 – График зависимости степени износа электродов от количества точек

На графике зависимости степени износа электродов от количества точек (рис. 34) видно, что электроды, которые были получены литьем и горячей штамповкой изнашиваются на 50–70 % меньше, чем электроды из аналогичного сплава БрХ1, а следовательно дольше работают до полного износа, что в значительной мере снижает конечную стоимость продукции.

### 3.3 Определение твёрдости и электропроводности образцов

Полученные после литья, штамповки и термообработки образцы электродов очищали, а торцы рабочей поверхности протачивали на токарно-винторезном станке марки 1E95. Измерение твердости образцов определяли на твердомере ТБ 5004 по стандартной методике.

Измерение удельной электропроводности проводили на микроомметре Ф4104–М1, принцип действия которого основан на измерении величины падения напряжения на измеряемом сопротивлении при прохождении через него оперативного тока заданной величины. Погрешность прибора 2,5 %, на каждом образце проводилось по пять измерений в различных областях.

Полученные средние значения твердости НВ (рис. 35), микротвердости и удельной электропроводности (рис. 36) сведены в табл. 14.

Таблица 14 – Твердость, микротвердость и электропроводность образцов

№ партии образцов	Удельное сопротивление, (Ом·мм <sup>2</sup> )/м	Удельная электропроводность, м/(Ом·мм <sup>2</sup> )	Твердость НВ	Микротвердость МПа	Удельная электропроводимость материала в % IACS
1	0,0260	40	160	840	74
2	0,0250	29	70	380	40
3	0,0385	26	78	442	44
4	0,0204	44	138	508	86
5	0,0233	43	119	594	76

Примечание: Партии образцов электродов: 1 – отожженные и холоднодеформированные; 2 – отожженные; 3 – литые; 4 – литые штампованные, закаленные, отпущенные; 5 – из прутка БрХ1.



Рисунок 35 – Гистограмма твёрдости образцов, определяемых на твердомере ТБ 5004

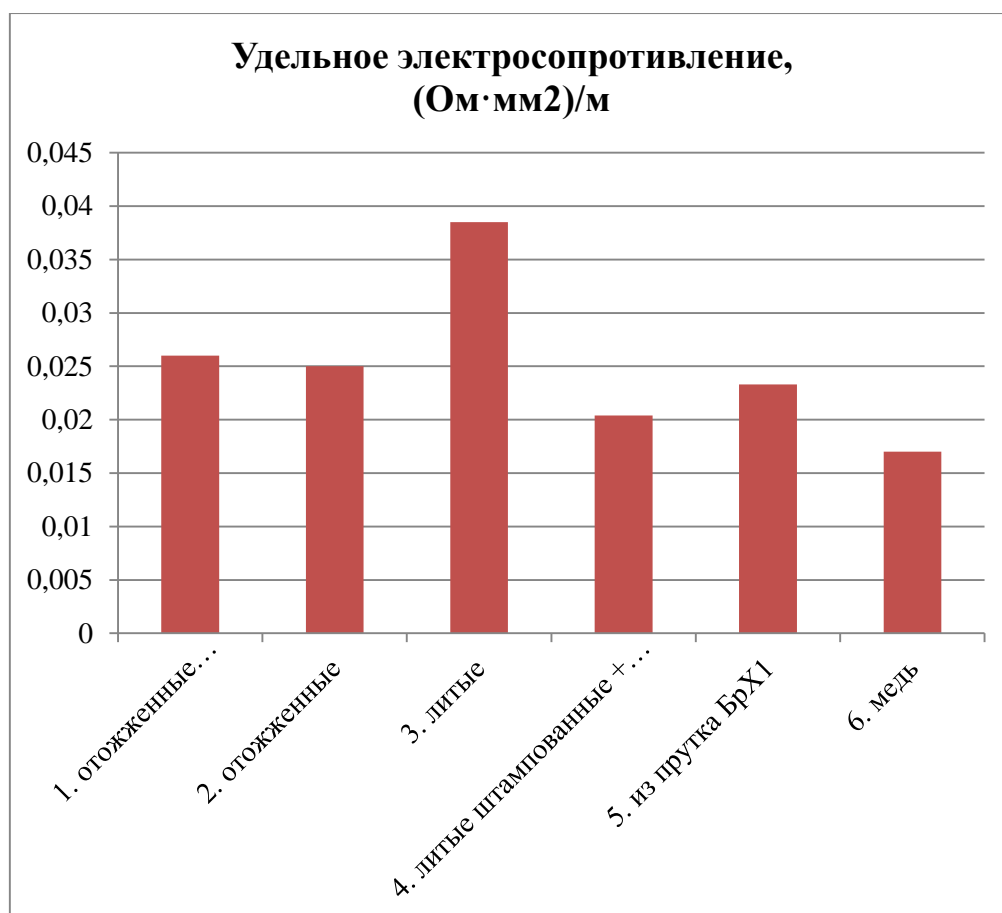


Рисунок 36 – Гистограмма удельного электросопротивления образцов

По результатам испытаний образцов на твердость, микротвердость и удельную электропроводность видно, что партия образцов 4 полученная в лабораторных условиях совмещенным способом литья и горячей штамповки, превосходит по электропроводности и твердости партию образцов 5, с таким же содержанием хрома и режимами термообработки, полученной в промышленных условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненной работы дают основание сделать выводы:

1 В традиционных методах изготовления электродов происходит расплавление лигатуры хрома, он полностью растворяется в твердом растворе, а в технологии литья совмещенного с горячей штамповкой происходит равномерное распределение хрома по сечению образца, он остается в виде мелких дисперсных включений, не растворяется, что позволяет сохранить высокие механические свойства и низкое электросопротивление, которое близко к электросопротивлению чистой меди.

2 Для того, чтобы получить нужный по химическому составу сплав хромистой бронзы БрХ1 подходит применение медных таблеток с содержанием наноструктурированных частиц хрома.

3 Электроды, полученные методом литья и горячей штамповки можно получить сложной формы.

4 Использование совмещенного способа литья и штамповки, а также необходимой термообработки, позволяют получать электроды, по твердости, электропроводности и стойкости, превосходящие электроды из аналогичных сплавов, полученных по традиционной технологии литья.

5 Так как износ образцов, полученных методом литья и горячей штамповки, меньше, чем у электродов из сплава БрХ1, полученных литьем, то такое производство значительно снижает стоимость этих электродов, повышая экологичность безотходного производства.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Технология и оборудование контактной сварки. Под ред. Б. Д. Орлова. М., «Машиностроение», 1975. – 536 с.
- 2 Николаев А. К. Дисперсионное твердение – эффективное направление синтеза конструкционных сплавов. / РИТМ. 2011. № 3. – 31–35с.
- 3 Получение электродов контактной сварки совмещенным способом литья и штамповки / С. Л. Бусыгин, А. М. Синичкин, А. М. Токмин / Metallurgy машиностроения. 2013. Вып. № 2. – 39–43 с.
- 4 Чулошников П, Л. Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов М., «Машиностроение», 1974. – 232 с.
- 5 Кабанов Н. С., Слепак Э. С. Технология стыковой контактной сварки. М.: Машиностроение, 1970. – 264 с.
- 6 Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. М.: Машиностроение, 1969. – 440 с.
- 7 Слиозберг С. К., Чулошников П. Л. Электроды для контактной электро-сварки. Л., «Машиностроение», 1972. – 96 с.
- 8 Кнорозов Б.В., Усова Л.Ф., Третьяков А.В. Технология металлов и материаловедение. – М., Metallurgy, 1987. – 800 с.
- 9 Справочник машиностроителя. Т. 5, кн. 1. Под ред. Сатель Э.А. - М., Машгиз, 1963. – 451 с.
- 10 Арзамасов, Б. Н. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
- 11 Гуляев А. И. Технология и оборудование контактной сварки. М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
- 12 Кабанов Н. С., Слепак Э. Ш. Технология стыковой контактной сварки. М., «Машиностроение», 1970. – 204 с.
- 13 Применение ресурсосберегающей технологии металлургической переработки меди и медных сплавов для получения электродов контактной сварки / С. Л. Бусыгин, А. П. Рукоусев, С. К. Крушатина и др. / Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 6 (32). – 119–121 с.
- 14 Пат. 2412035 Российская Федерация, В23К 35/40, В23К 11/30. Способ изготовления электродов для контактной сварки / С. Л. Бусыгин, А. И. Демченко, А. С. Рафальский. № 2010108888/02; заявл. 09.03.2010; опубл. 20.02.2011, Бюл. №5. – 5 с.
- 15 О выплавке в индукционной тигельной печи хромовой бронзы для электродов контактной сварки / С. Л. Бусыгин, А. М. Токмин, М. В. Первухин, В. С. Казаков, М.Ю. Кучинский / Metallurgy машиностроения. 2016. Вып. № 1. – 7–9 с.
- 16 Николаев А. К., Розенберг В. М. Сплавы для электродов контактной сварки. М. : Metallurgy, 1978. – 96 с.



- 17 Николаев А. К., Костин С.А. Медь и жаропрочные медные сплавы. Энциклопедический и терминологический словарь. Фундаментальный справочник. – М.: ДПК Пресс. – 720 с.
- 18 В. П. Бакалеев «Сплав для электродов контактных сварочных машин» Авторское свидетельство СССР № 291766, кл. В23к 11/30. – Бюллетень «Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1971, № 4. – 31 с.
- 19 Николаев А. К., Новиков А. И., Розенберг В. М. Хромовые бронзы. М.: Металлургия, 1983. – 176 с.
- 20 А.И. Самохоцкий Н.Г. Парфеновская «Технология термической обработки металлов» М. Машиностроение 1976 г. – 311 с.
- 21 В.М. Зуев «Термическая обработка металлов» М. Высшая школа 1986 г. – 288 с.
- 22 Axio Observer для материаловедения [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.optecgroup.com/equipment/inverted\\_micro/axio-observer-mat/](http://www.optecgroup.com/equipment/inverted_micro/axio-observer-mat/).
- 23 РЭМ НІТАСНІ ТМ–1000 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://ccu.kirensky.ru/info/31/>.
- 24 JEOL JSM–7001F [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://research.sfu-kras.ru/node/22>
- 25 ГОСТ 6996-66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – Взамен ГОСТ 6996–54; введ. 01.01.1967. – Москва: Стандартинформ, 1967. – 45 с.
- 26 Быконя, Л. А. Испытание на микротвердость: метод. указания / Л.А. Быконя. – Красноярск: КГТУ, 1998. – 15 с.
- 27 ГОСТ 9450–76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – Взамен ГОСТ 9450-60; введ. 01.01.1977. Москва: Стандартинформ, 1977. – 35 с.
- 28 ГОСТ 9013–59 (ИСО 6508-86) Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу; введ. 01.01.1969. – Москва: Стандартинформ, 1969. – 10 с.
- 29 ГОСТ 22261–94 «Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия». – Взамен ГОСТ 22261–82; введ. 01.01.1996. – Минск: Стандартинформ, 1996. – 30 с.
- 30 Technological peculiarities of electric resistance welding of intersecting crosswise rods made of aluminum alloys / S.L. Busygin, A.I. Demchenko A.I., Yu.G. Novoseltsev, A.A.Bezrukich, A.A. Shaichadinov, M.A. Aryamnova // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2016, 9(6). – 905 с.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический Институт  
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой

 В.И. Темных

\_\_\_\_\_

подпись

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**Направление 22.04.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»**

**Структурообразование в хромовой бронзе  
при производстве электродов для контактной сварки**

Научный руководитель

  
\_\_\_\_\_

подпись, дата

В.С. Казаков

Выпускник

  
\_\_\_\_\_

подпись, дата

Е.А. Яковенко

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_

подпись, дата

 Л.А. Свечникова

Красноярск  
2019