

При высоких оборотах времени на открытие-закрытие клапанов значительно меньше, хотя топливовоздушной смеси нужно подавать больше. Следовательно, необходимо увеличить фазу открытия и высоту подъема клапана, чем и занимается VTEC, а система VTC “создает благоприятные условия” для ее эффективной работы.

Если система VTEC с помощью дополнительного кулачка позволяет вогнать клапаны глубже и незначительно увеличивает время открытого состояния, то VTC дает возможность довернуть распредвал таким образом, что клапаны откроются раньше, что способствует более эффективному продуванию цилиндров. В отличие от основной системы VTEC, которая включается в определенном диапазоне оборотов, дополнительная система VTC работает постоянно и непрерывно, регулируя момент открытия впускных клапанов в зависимости от нагрузки на двигатель.

### **Заключение**

Семейство газораспределительных механизмов VTEC дает просто поразительный эффект: их моторы умеют подстраиваться под нагрузку, предоставляя огромную мощность при скромном рабочем объеме. И в то же время на холостом и малом ходах японские моторы поражают выдающейся экономичностью. Вполне возможно, что следующим этапом в развитии систем VTEC станет механизм с отдельными соленоидами (от которых пока отказались из-за высокой стоимости) на каждый клапан, что позволит с хирургической точностью регулировать открытие клапанов. Атмосферные двигатели фирмы Honda имеют преимущества перед турбированными двигателями других производителей в том, что турбина сокращает ресурс мотора. Таким образом, система VTEC является еще одним инновационным подходом в создании мощного малообъемного двигателя, позволяющего с каждого литра мотора снимать до 120 л. с.

### **Список цитированных источников**

1. Система drive2.ru [сайт]. – URL: <https://drive2.ru> (дата обращения: 29.09.2024).
2. Информация об устройстве, поколениях системы V-tec // Wikipedia. – URL: <https://wikipedia.com> (дата обращения: 29.09.2024).

УДК 621.762

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТМО МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ ХРОМОВЫХ БРОНЗ**

*И. А. Лозиков, к. т. н., доцент, доцент кафедры технологии металлов, Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь, e-mail:Lozikoff@yandex.by*

### **Реферат**

В работе приведены результаты исследований влияния технологических факторов на структуру и свойства модифицированных жаропрочных хромовых бронз, полученных с применением механически сплавленных субмикроструктурные лигатуры с большим содержанием основного легирующего компонента при термической и термомеханической обработке. Изучена роль

температуры нагрева и продолжительности выдержки при закалке на кинетику растворения хрома. Получено представление о формирования физико-механических свойств при старении опытных бронз в зависимости от температуры и времени выдержки. Определены граничные условия пластической деформации при термомеханической обработке и получены зависимости для оптимизации процесса производства сплавов с максимальными прочностными характеристиками и свойствами жаропрочности, Исследована микроструктура сплавов на всех этапах ТО и ТМО.

Установлено, что жаропрочные хромовые бронзы, полученные с применением механически сплавленных субмикроструктурных лигатур с большим содержанием основного легирующего компонента, наследуя микроструктурный тип основы на всех этапах обработки, обладают более высоким комплексом физико-механических свойств по сравнению с классическими БрХ и БрХЦр даже после ТО. Применяв ТМО и проведя старение при 490–500° С можно получить уникальное сочетание характеристик прочности и жаропрочности, значительно повысив ресурс изделий электротехнического назначения, что подтверждается производственными испытаниями на ведущих машиностроительных предприятиях Республики Беларусь.

**Ключевые слова:** Получение, состав, структура, свойства, субмикроструктурные модифицирующие лигатуры, термическая обработка, термомеханическая обработка, хромовые бронзы.

## OPTIMIZATION OF TMO OF MODIFIED HEAT-RESISTANT CHROME BRONZES

I. A. Lozikov

### Abstract

The paper presents the results of studies of the influence of technological factors during thermal and thermomechanical processing on the structure and properties of modified heat-resistant chrome bronzes obtained using mechanically fused submicrocrystalline ligatures with a high content of the main alloying component. The role of the heating temperature and the duration of exposure during quenching on the kinetics of chromium dissolution has been studied. An idea of the formation of physico-mechanical properties during aging of experimental bronzes depending on temperature and exposure time is obtained. The boundary conditions of plastic deformation during thermomechanical processing are determined and dependences are obtained to optimize the production process of alloys with maximum strength characteristics and heat resistance properties. The microstructure of alloys at all stages of TO and TMO has been studied.

It has been established that heat-resistant chrome bronzes obtained using mechanically fused submicrocrystalline ligatures with a high content of the main alloying component, inheriting the microcrystalline type of base at all stages of processing, have a higher complex of physico-mechanical properties compared with classical BrX and BrXCr even after maintenance. By applying TMO and aging at 490-500 oC, it is possible to obtain a unique combination of strength and heat resistance characteristics, significantly increasing the life of electrical products, which is confirmed by production tests at leading machine-building enterprises of the Republic of Belarus.

**Keywords:** Production, composition, properties, submicrocrystalline modifying ligatures, heat treatment, thermomechanical treatment, chrome bronzes.

## Введение

При большом многообразии бронз электротехнического назначения наибольшее применение нашли сплавы систем «Cu – Sn» и «Cu – Sn – Zr», доля выпуска которых среди всех хромосодержащих сплавов достигает 90 %. Основное их назначение – производство электродов контактной сварки (точечной, шовной, рельефной и др.), а также контактов электротехнических устройств. Хромовые бронзы являются классическими дисперсионно-твердеющими сплавами и имеют оптимальное сочетание физических, механических и эксплуатационных свойств после термической либо термомеханической обработки. Термическая обработка включает закалку, фиксирующую пересыщенный твердый раствор, и старение, в результате которого происходит его распад с выделением дисперсных частиц фаз-упрочнителей. Термомеханическая обработка (ТМО), кроме закалки и старения, включает холодную пластическую деформацию, проводимую после закалки, которая активно влияет на формирование структуры при старении. Абсолютный уровень прочностных свойств у сплавов, прошедших ТМО, значительно выше, чем у сплавов, подвергнутых старению без предварительной деформации [1–3].

Но имеющая место в массовом производстве тенденция интенсификации процессов сварки и рост их энергонапряженности требуют еще более высоких свойств у промышленно выпускаемых бронз. Работоспособность электродов контактной сварки и разрывных контактов электротехнических устройств, а также технологичность их изготовления определяются комплексом из многих составляющих, включающих электропроводность, температуру рекристаллизации, твердость, предел прочности, пластичность и др. Существующие методы обработки свои возможности по упрощению и удешевлению процесса производства бронз, повышению их комплекса физико-механических свойств исчерпали себя. Решение проблемы находится на пути применения новых технологий.

Одним из перспективных способов повышения механических свойств металлических материалов является применение лигатур, содержащих ультрадисперсные включения, выполняющие роль модификаторов первого рода. При этом эффект модифицирования возрастает с уменьшением величины частиц модификатора до наноразмерного. В последнее десятилетие этому научному направлению в мире, в том числе, в Республике Беларусь, уделяется достаточно большое внимание. Некоторые представления о состоянии вопроса дают результаты исследований, приведенные в работах [4–14].

В МОУВО «Белорусско-Российский университет» (г. Могилев) разработана технология реакционного механического сплавления, позволяющая получать субмикроструктурные лигатуры с большим содержанием основного легирующего компонента и синтезированными в процессе обработки наноразмерными соединениями. Они имеют высокий модифицирующий эффект и позволяют производить бронзы микрокристаллического типа с комплексом физико-механических свойств, значительно превосходящим аналоги. Ряд выполненных исследований [15–21] показал перспективность применения новых материалов,

однако на сегодняшний день технология их производства разработана не до конца и требует ряд уточнений.

*Целью данной работы* являлась оптимизация процессов ТМО модифицированных жаропрочных хромовых бронз, полученных с применением механически сплавленных субмикроструктурных лигатур с большим содержанием основного легирующего компонента.

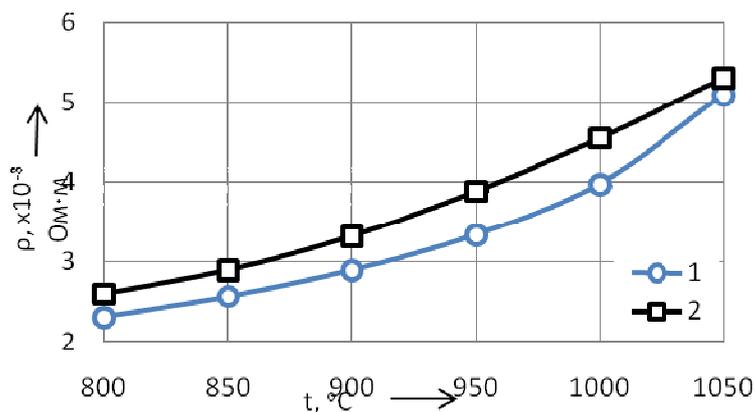
### **Материалы, оборудование и методика исследования.**

Исследования проводились на образцах хромовых бронз с содержанием хрома 0,9 %, полученных литьем с применением механически сплавленной лигатуры и хромовых бронз марки БрХ1, поставляемых предприятиям Республики Беларусь из Российской Федерации, являющейся основным производителем материалов данной группы. Химический состав сплавов двух групп соответствовал ГОСТ 18175-78 и контролировался при помощи спектрографа SPЕC-TROMAXx (Германия). Нагрев образцов осуществлялся в лабораторной печи SNOL 30/1100, оснащенной PID – регулирующим блоком контроля температуры OMRONE5CN в защитной атмосфере Ar. Металлографический анализ проводился на металлографическом комплексе МКИ-2М (Беларусь), сканирующем электронном микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия). Исследование элементного состава выполнялось на микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа «INCA ENERGY 350/XT» с безазотным детектором X-Act ADD (OXFORD Instruments Nano Analysis, Великобритания) при линейном непрерывном и шаговом сканировании, а также сканировании по площади. Механические свойства определялись по стандартной методике на пропорциональных цилиндрических образцах с диаметром в рабочей части 5 мм и с начальной расчетной длиной 25 мм. Исследования выполнялись на разрывной машине МР-100. Твердость измеряли по методу Бринеля на твердомере ТБ-5004. Электропроводность мерили при помощи многофункционального прибора измерения геометрических параметров «Константа К5».

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

Особенностью термической обработки хромовых бронз как классических дисперсионно-твердеющих сплавов, является обязательное выполнение закалки от некоторой определенной температуры, образующей твердый раствор максимально возможного пресыщения хромом и последующее старение, при котором образовавшийся пересыщенный раствор распадается с выделением дисперсных частиц хрома или хромсодержащих соединений, являющихся упрочняющими фазами в материалах данного типа. Качество закалки определяется концентрацией хрома в пересыщенном твердом растворе, Его содержание можно контролировать методом измерения электропроводности закаленных образцов приборами для измерения электропроводности, что и выполнялось в данной работе.

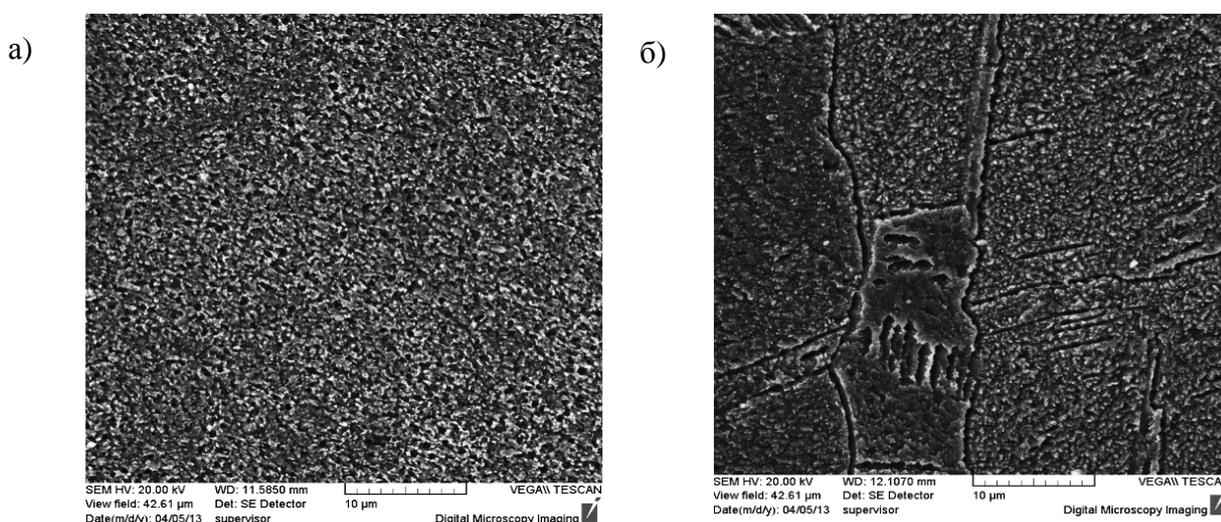
При выполнении исследований изучалось изменение сопротивления образцов (что указывает о количестве растворенного хрома) в зависимости от температуры закалки и времени нагрева. Полученные результаты представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Зависимость электросопротивления БрХ1 (1) и экспериментальной бронзы (2) от температуры закалки**

Полученные результаты согласуются с диаграммой состояния Cu – Cr и близки для всех рассматриваемых сплавов. Повышение температуры нагрева под закалку до максимально возможной, приближающейся к температуре эвтектики, приводит к увеличению содержания хрома в твердом растворе, а, следовательно, в дальнейшем к некоторому повышению прочностных свойств.

Более высокое электросопротивление бронзы, полученной с применением механически сплавленной лигатуры можно объяснить дисперсностью структуры, и, как следствие, высокой суммарной поверхностью зерен основы, обусловленной формированием структуры микрокристаллического типа (см. рисунок 2).



**Рисунок 2 – Структура закаленной экспериментальной бронзы (а) и БрХ1 (б):×5000**

Это также объясняет высокую твердость разработанных сплавов по сравнению с классической бронзой после закалки с разных температур при одной и той же продолжительности нагрева.

Сравнительные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Твердость после закалки классических и экспериментальных сплавов

Температура закалки, °С	Твердость после закалки классической бронзы БрХ, НВ	Твердость после закалки экспериментальной бронзы БрХ, НВ
800	48	68
850	50	68
900	49	69
950	49	69
1000	48	68
1050	48	68

Но анализ литературных данных, а также опыт промышленного применения хромовой и хромоциркониевой бронз показывает, что оптимальная температура закалки этих сплавов равна  $1000 \pm 20^\circ$ . Рекомендуемое время выдержки зависит от массы изделия и чаще всего составляет 30–60 минут [1, 22]. Изучение влияния времени выдержки на растворение хрома подтвердил это. При 60 минутах нагрева при температуре  $1020^\circ$  С проходит полное завершение процессов и дальнейшее нахождение образцов в печи на количество находящегося в твердом растворе хрома (величину электросопротивления) заметного влияния не оказывает.

После первой операции термической обработки хромовых бронз – закалки образуется пересыщенный твердый раствор, который при выполнении последующей операции – старения является источником образования наноразмерных частиц хрома, обеспечивающих формирование высоких физико-механических свойств сплавов. Основными факторами, влияющими на полноту протекающих процессов при старении, являются температура нагрева заготовки и время выдержки в нагретом состоянии. Целью исследований на данном этапе являлось определение влияния температуры и продолжительности нагрева при старении на структуру и свойства жаропрочных электротехнических хромовых бронз.

Изменения величины электрического сопротивления и твердости от температуры старения для экспериментальной бронзы и БрХ1 представлены на рисунке 3.

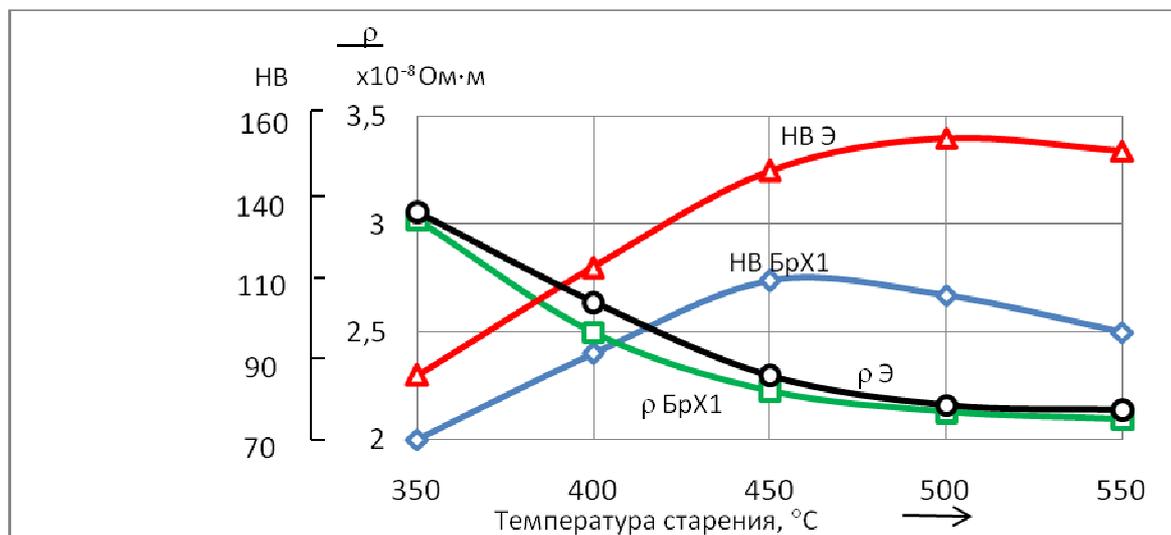
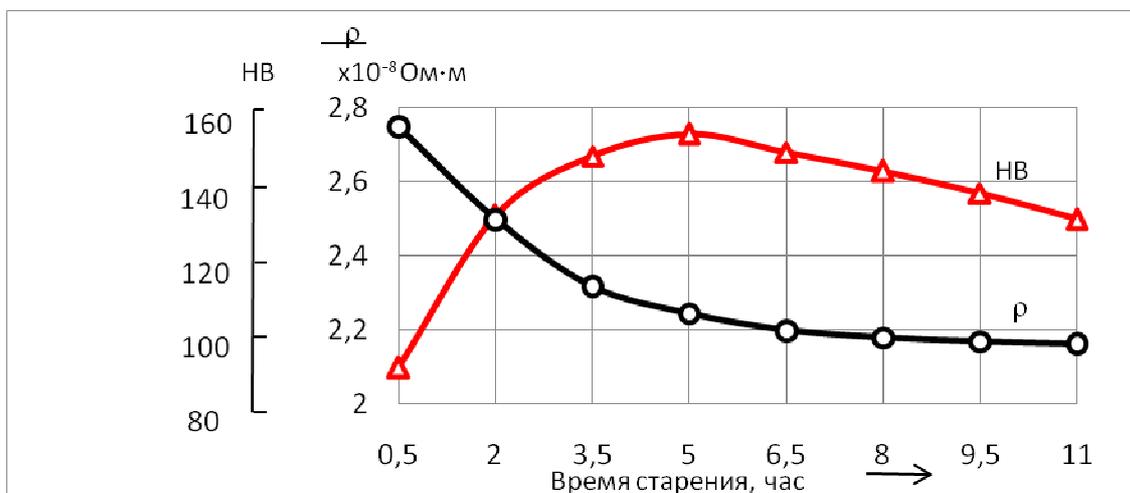


Рисунок 3 – Зависимость изменения электрического сопротивления и твердости от температуры старения для экспериментальной бронзы (Э) и БрХ1

На рисунке 4 представлены результаты исследования продолжительности нагрева при старении на твердость и электропроводность экспериментальных сплавов.



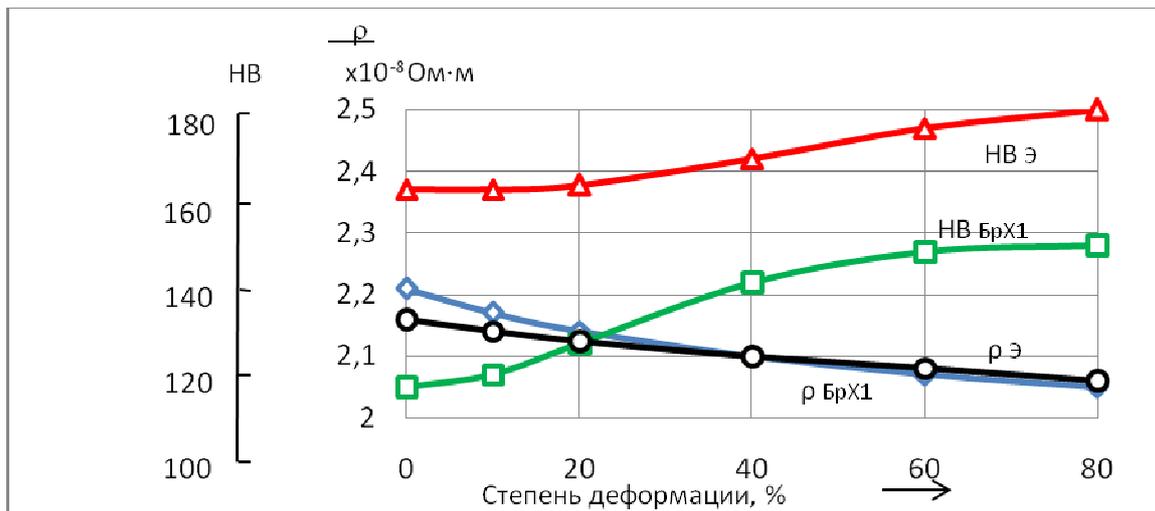
**Рисунок 4 – Зависимость изменения электрического сопротивления и твердости от времени старения для экспериментальной бронзы**

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что для модифицированных бронз оптимальный температурный интервал старения находится в пределах  $490\text{--}500^\circ\text{C}$ , что на  $40\text{--}50^\circ\text{C}$  превышает температуру старения классических бронз, тем самым доказывая более высокие свойства жаропрочности разработанных сплавов. Снижение температуры не позволяет завершиться процессам распада пересыщенного раствора и выделению упрочняющей фазы, на что указывает высокое электросопротивление и пониженная твердость образцов. А ее повышение ведет к коагуляции дисперсных включений хрома и, как следствие, разупрочнению сплава. Распад твердого раствора и выделение упрочняющей фазы практически полностью завершается в течение 3–3,5 час. Максимальное значение твердости достигается через 4,5–5 часов. Дальнейшая выдержка приводит к разупрочнению сплава, что объясняется началом процесса коагуляции и укрупнению частиц хрома. На этот процесс также указывает и некоторое повышение электропроводности.

При этом твердость и электропроводность БрХ1 после старения не достигает своего максимума, что предполагает неполное протекание вышеуказанных процессов даже при оптимальных температурах. Достигнуть большей полноты распада пересыщенного раствора и повышения физико-механических свойств можно применив термомеханическую обработку [1, 2].

Исследования влияния ТМО на свойства и структуру сплавов проводились на образцах того же состава, подвергнутых закалке на воду с температуры  $1030^\circ\text{C}$ . Время нагрева перед закалкой составляло 60 минут. Пластическая деформация после закалки осуществлялась поперечной прокаткой со степенью деформации 10, 20, 40, 60 и 80 %. После деформации образцы подвергали старению при температуре  $450^\circ\text{C}$  (для БрХ1) и  $490^\circ\text{C}$  (для экспериментальных бронз) в течение 4-х часов с последующим охлаждением в печи.

Результаты изменения величины электрического сопротивления и твердости от величины степени деформации для сплавов двух типов приведены на рисунке 5.



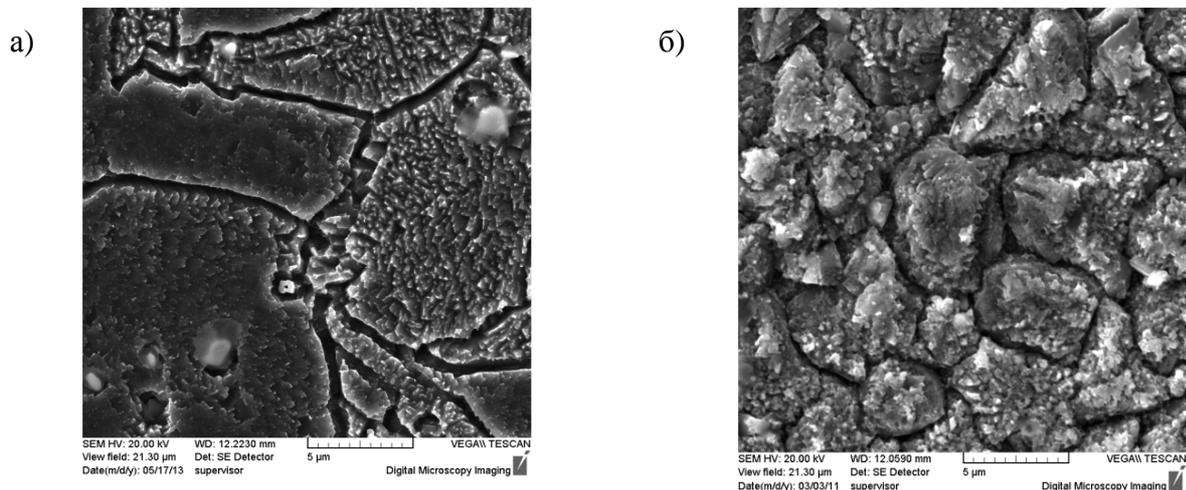
**Рисунок 5 – Зависимость изменения электрического сопротивления и твердости от степени деформации для экспериментальной бронзы (Э) и БрХ1**

Полученные результаты показывают, что для классических хромовых бронз промежуточная пластическая деформация является необходимой операцией, без которой нельзя достигнуть требуемого комплекса физико-механические свойства сплавов. Эффект упрочнения возникает уже после 20 % деформации и достигает максимума при достижении 80 %. При этом наблюдается значительное возрастание электропроводности – с 70–71 % от электропроводности меди без деформации до 78–79 % после деформации с 80 % степенью и твердости со 110 НВ до 130–140 НВ. Это полностью согласуется с механизмом упрочнения подобных сплавов при пластической деформации, приведенном в работах [1, 2].

Экспериментальные сплавы даже без пластической деформации обладают характеристиками твердости, значительно превышающими характеристики аналогов, принятых для сравнения. Пластическая деформация со степенями менее 30 % практически не оказывает влияния на свойства сплава. Дальнейшее ее увеличение до 80 % приводит к приросту твердости на 10–12 % и повышению электропроводности на 0,9–1,2 %, что позволяет получать материалы с комплексом свойств, значительно превышающим существующие аналоги.

Подобное поведение при пластической деформации, возможно, объясняется исходной структурой бронз, полученных с применением механически сплавленной лигатуры и наследовавших ее мелкозернистость. Структура основы бронзы после закалки относится к микрокристаллическому типу и представляет собой зерна твердого раствора размером 0,2–0,5 мкм. При такой величине зерна механизм пластической деформации, возможно, подобен механизму пластической деформации дисперсно-упрочненным материалам, для которых в ее процессе размер и форма зерен практически не меняется.

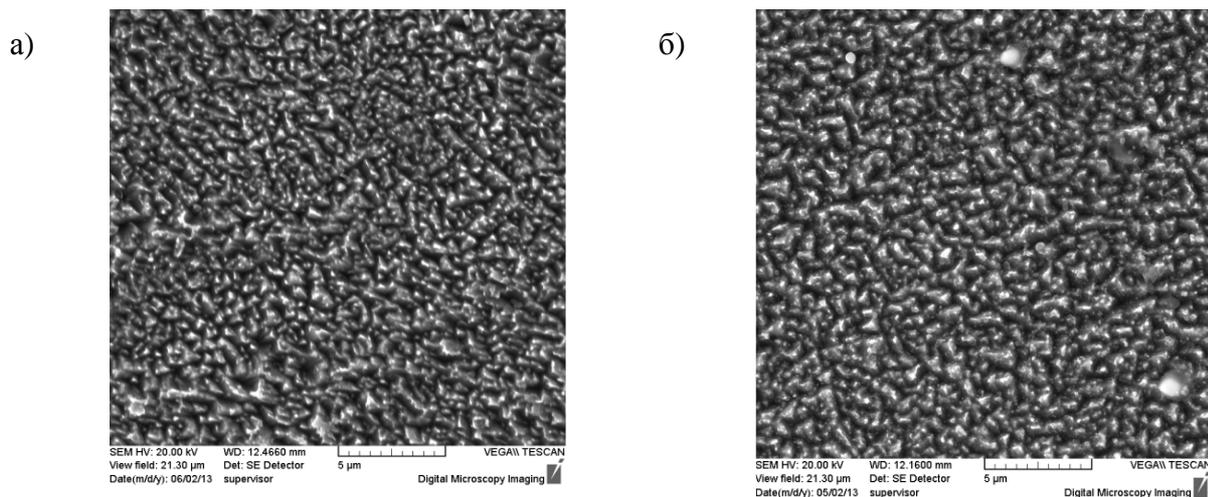
Достоверность приведенных выше рассуждений подтверждает сравнительное изучение структуры образцов до и после пластической деформации. На рисунке 6 приведена структура бронзы БрХ1 подвергнутая термической (а) и термомеханической (б) обработке, из которого видно значительное влияние промежуточной пластической деформации на строение сплава. После ТМО размер зерен основы бронзы уменьшается примерно в 2 раза и составляет 5–8 мкм (см. рисунок 6).



*а) закалка + старение; б) закалка + пластическая деформация 80 % + старение:  $\times 10000$*   
**Рисунок 6 – Структура образцов бронзы БрХ1**

На рисунке 7 приведена структура экспериментальной бронзы, полученной с применением механически легированной лигатуры и подвергнутой термической и термомеханической обработке по режимам, приведенным выше.

Структура относится к микрокристаллическому типу, с размером зерен 0,5–2 мкм. Промежуточная пластическая деформация в процессе обработки (рисунок 7б) не оказывает значительного влияния на структуру сплава.



*а) закалка + старение б) закалка + пластическая деформация 80 % + старение:  $\times 10000$*   
**Рисунок 7 – Структура образцов экспериментальной бронзы**

Применение механически сплавленных модифицирующих лигатур наряду с упрощением и удешевлением технологии получения жаропрочных бронз приводит также к значительному повышению физико-механических свойств. Экспериментальные материалы по таким показателям как прочность, твердость и, в особенности, температуры начала рекристаллизации примерно на 15–20 % превосходят не только БрХ1, но и более дорогую БрХЦр. В то же время, вследствие особенности структуры, примерно на такую величину они уступают последним по пластичности.

Таблица 2 – Физико-механические свойства классических и экспериментальных бронз

Материал	$\sigma_B$ , МПа	НВ	$\delta$ , %	$T_{нач. рек.}$ , °С	$\rho \times 10^8$ , Ом·м
БрХ1	440	130–140	34	400	2,23
БрХЦр	500	140–150	30	450	2,18
Экспериментальная бронза	560	175–180	25	600	2,25

Приведенное сочетание свойств обусловлено комплексным упрочнением материалов, включающем зернограничное, дисперсионное и дисперсное. Наличие последнего является решающим фактором, определяющим высокую жаропрочность экспериментальных бронз.

Высокие характеристики сплавов подтверждаются производственными испытаниями изделий, изготовленных из них. По заключению ОАО «Белкард» (г. Гродно) стойкость электродов контактной точечной сварки из экспериментального сплава в 3,8 раза превышает аналогичный показатель для электродов из БрХ1 производства Российской Федерации.

### Заключение

Результаты выполненных исследований показывают, что жаропрочные хромовые бронзы, полученные с применением механически сплавленных субмикроструктурных лигатур с большим содержанием основного легирующего компонента, наследуя микроструктурный тип основы на всех этапах обработки, обладают более высоким комплексом физико-механических свойств по сравнению с классическими БрХ и БрХЦр даже после ТО. Применяв ТМО и проведя старение при 490–500°С можно получить уникальное сочетание характеристик прочности и жаропрочности, значительно повысив ресурс изделий электротехнического назначения, что подтверждается производственными испытаниями на ведущих машиностроительных предприятиях Республики Беларусь.

### Список цитированных источников

1. Николаев, А. К. Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, В. М. Розенберг. – М. : Металлургия, 1978. – 96 с.
2. Николаев, А. К. Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. – М. : Металлургия, 1983. – 175 с.
3. Новиков, И. И. Теория термической обработки / И. И. Новиков. – М. : Металлургия, 1978. – 392 с.
4. Крушенко, Г. Г. Повышение качества чугунных отливок с помощью нанопорошков / Г. Г. Крушенко, И. С. Ямских, А. С. Бонченков // Металлургия машиностроения. – 2002. – № 2. – С. 20–21.
5. Черепанов, А. Н. Применение ультрадисперсных порошков для улучшения свойств металлов и сплавов / А. П. Черепанов, В. А. Полубояров, А. П. Калинина // Материаловедение. – 2000. – № 10. – С. 45–53.
6. Цивирко, Э. И. Модифицирование наночастицами Ti (CN) отливок деталей из сплава ЖСЗДК-ВИ с пониженным содержанием углерода / Э. И. Цивирко, Н. А. Лысенко, В. В. Клачихин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 3. – С. 42–44.
7. Ловшенко, Г. Ф. Повышение эффективности модифицирования серого чугуна за счет введения в состав модификатора углерода / Г. Ф. Ловшенко, О. С. Комаров, Н. И. Урбанович // Литье и металлургия. – 2010. – № 3. – С. 47–50.
8. Зыкова, А. П. Влияние модифицирования ультрадисперсными порошками оксидов тугоплавких металлов и криолита на структуру, механические свойства и разрушение чугуна СЧ 25 / А. П. Зыкова, Д. В. Лычагин, А. В. Чумаевский // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 11. – С. 37–42.

9. Калиниченко, А. С. Перспективы использования наноразмерных порошков для получения модифицирующих лигатур / А. С. Калиниченко, А. Г. Слуцкий, В. А. Шайнерт // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 1. – С. 65–73.

10. Калиниченко, А. С. Использование модифицирующей лигатуры, содержащей нанодисперсные порошки активных элементов при получении высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / А. С. Калиниченко, А. Г. Слуцкий, В. А. Шайнерт // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 3. – С. 101–106.

11. Комаров, О. С. Наноразмерные и ультрадисперсные частицы в литейных технологиях / О. С. Комаров, В. И. Волосатиков, И. Б. Проворова // *Литье и металлургия*. – 2014. – № 2. – С. 42–46.

12. Марукович, Е. И. Модифицирование сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко. – Минск : Беларуская навука, 2009. – 217 с.

13. Ловшенко, Г. Ф. Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.

14. Термодинамическое моделирование гетерогенного взаимодействия при механическом легировании в системах на основе меди / Ф. Г. Ловшенко [и др.] // *Вестн. Бел.-Рос. ун-та*. – 2012. – № 1. – С. 23–34.

15. Ловшенко, Ф. Г. Научные принципы создания высокостойких хромовых бронз электротехнического назначения с применением технологии, сочетающей реакционное механическое легирование и литье / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Перспективные технологии (монография)*; под ред. В. В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2011. – С. 214–233.

16. Ловшенко Ф. Г. Литые хромсодержащие бронзы, получаемые с применением механически легированных лигатур / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Литье и металлургия*. – 2012 – № 3. – С. 131–135.

17. Ловшенко, Ф. Г. Бронзы электротехнического назначения и особенности их производства / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Вестн. Бел.-Рос. ун-та*. – 2012. – № 3. – С. 36–52.

18. Ловшенко, Ф. Г. Получение механически легированных наноструктурных модифицирующих лигатур для производства высокопрочных субмикроструктурных бронз электротехнического назначения / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 2. – С. 115–126.

19. Ловшенко, Ф. Г. Механически легированные модифицирующие лигатуры для производства высокопрочных бронз электротехнического назначения / Ф. Г. Ловшенко, Н. Н. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Материалы 33-й междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности»*, Киев, 1–5 июня 2013 г. / Наука, Техника, Технология [и др.]; редкол. : О. Н. Будадин [и др.]. – Киев, 2013. – С. 69–73.

20. Ловшенко, Ф. Г. Моделирование растворения лигатуры в расплаве меди при выплавке хромовых бронз и оптимизация процесса их производства / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, Б. Б. Хина, И. А. Лозиков // *Литье и металлургия*. – 2013, № 4. – С. 125–133.

21. Ловшенко, Ф. Г. Закономерности формирования механически легированных гранулированных лигатур системы «медь-хром» / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Вестн. Бел.-Рос. ун-та*. – 2014. – № 2. – С. 37–48.

22. Бутомо, Д. Г. Изменение растворимости хрома в хромовой бронзе марки БрХ0,5 в зависимости от термической обработки / Д. Г. Бутомо, Н. И. Зедин // *Цветные металлы*, –1960. – № 3. – С. 62–68.

## References

1, Nikolaev, A,K, Alloys for contact welding electrodes / A,K, Nikolaev, V,M, Rosenberg, - M, : Metallurgy, 1978, - 96 p,

2, Nikolaev, A,K, Chrome bronzes / A,K, Nikolaev, A,I, Novikov, V,M, Rosenberg, - M,: Metallurgy, 1983, - 175 p,

3, Novikov, I,I, Theory of heat treatment / I,I, Novikov, - M,: Metallurgy, 1978, - 392 p,

4, Krushenko, G, G, Improving the quality of cast iron castings with the help of nanopowders / Krushenko G, G., Yamskikh I, S., Bonchenkov A, S, // *Metallurgy of mechanical engineering*, - 2002, – No, 2, – pp, 20-21,

- 5, Cherepanov, A, N, The use of ultrafine powders to improve the properties of metals and alloys / A, P, Cherepanov, V, A, Poluboyarov, A, P, Kalinina // Materials Science, - 2000, - No, 10, - pp, 45-53,
- 6, Tsivirko, E, I, Modification with Ti(C N) nanoparticles of castings of parts from the LC3DK-VI alloy with a reduced carbon content /E, I, Tsivirko, N, A, Lysenko, V, V, Klachikhin // East European Journal of Advanced Technologies, - 2010, - No, 3, - pp, 42-44,
- 7, Lovshenko, G, F, Improving the efficiency of modifying gray cast iron by introducing a carbon modifier into the composition / G, F, Lovshenko, O, S, Komarov, N, I, Urbanovich // Casting and metallurgy, - 2010, - No, 3, - pp, 47-50,
- 8, Zykova, A, P, The effect of modification of refractory metal oxides and cryolite with ultrafine powders on the structure, mechanical properties and destruction of cast iron SCH 25 / A, P, Zykova, D, V, Lychagin, A, V, Chumaevsky // Izv, universities, Ferrous metallurgy, - 2014, - No, 11, - pp, 37-42,
- 9, Kalinichenko, A, S, Prospects of using nanoscale powders to obtain modifying ligatures / A, S, Kalinichenko, A, G, Slutsky, V, A, Shainert // Casting and metallurgy, - 2015, - No, 1, - pp, 65-73,
- 10, Kalinichenko, A, S, The use of a modifying ligature containing nanodisperse powders of active elements in the production of high-strength cast iron with spherical graphite / A, S, Kalinichenko, A, G, Slutsky, V, A, Shainert // Casting and metallurgy - 2015, - No, 3, - p, 101 - 106,
- 11, Komarov, O, S, Nanoscale and ultrafine particles in foundry technologies / O, S., Komarov V, I, Volosatikov, I, B, Provorova // Casting and metallurgy, - 2014, - No, 2, - pp, 42-46,
- 12, Marukovich, E, I, Modification of alloys / E, I, Marukovich, V, Yu, Stetsenko, - Ministry of Finance: Belarusskayanavuka, 2009, - 217 p,
- 13, Lovshenko, G, F, Nanostructured mechanically alloyed materials based on metals: monograph / G, F, Lovshenko, F, G, Lovshenko B, B, Khina; edited by Dr, of Technical Sciences, Prof, F, G, Lovshenko, Mogilev :Byeloruss, -Russian University, 2008, - 679 p ,
- 14, Thermodynamic modeling of heterogeneous interaction during mechanical alloying in copper-based systems / F, G, Lovshenko [et al.], // Bulletin of the Belarusian-Russian University, - 2012, - No, 1, - pp, 23-34,
- 15, Lovshenko, F, G, Scientific principles of creating highly resistant chrome bronzes for electrical purposes using technology combining reactive mechanical alloying and casting / F, G, Lovshenko, G, F, Lovshenko, I, A,
- 16, Lovshenko F, G, Cast chrome-containing bronzes obtained using mechanically alloyed ligatures / F, G, Lovshenko, G, F, Lovshenko, I, A, Lozikov // Casting and metallurgy, - 2012, No, 3, - pp, 131-135,
- 17, Lovshenko, F, G, Bronzes of electrotechnical purpose and features of their production / F, G, Lovshenko, G, F, Lovshenko, I, A, Lozikov // Bulletin of the Belarusian-Russian University, - 2012, - No, 3, - pp, 36-52,
- 18, Lovshenko F, G, Obtaining mechanically alloyed nanostructured modifying ligatures for the production of high-strength submicrocrystalline bronzes for electrical purposes / F, G, Lovshenko, G, F, Lovshenko, I, A, Lozikov // Casting and metallurgy, - 2013, - No, 2, - pp, 115-126,
- 19, Lovshenko, F, G, Mechanically alloyed modifying ligatures for the production of high-strength bronzes for electrical purposes / F, G, Lovshenko, N, N, Lovshenko, I, A, Lozikov // Materials of the 33rd International Conference, "Composite materials in industry" (June 1-5),/ UIC "Science, Technic,
- 20, Lovshenko F, G, Modeling of ligature dissolution in copper melt during the smelting of chrome bronzes and optimization of their production process / F, G, Lovshenko, G, F, Lovshenko, B, B, Khina, I, A, Lozikov // Casting and metallurgy, - 2013, No, 4, - pp, 125-133,
- 21, Lovshenko, F, G, Patterns of formation of mechanically alloyed granular ligatures of the copper-chromium system / F, G, Lovshenko, G, F, Lovshenko, I, A, Lozikov // Bulletin of the Belarusian-Russian University, - 2014, - No, 2, - pp, 37-48,
- 22, Butomo, D, G, Change in the solubility of chromium in chrome bronze grade BrH0,5 depending on heat treatment / D, G, Butomo, N, I, Zedin // Non-ferrous metals, -1960, -No, 3, - pp, 62-68,