

УДК 537.63:539.26

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА БЕРИЛЛИЕВОЙ БРОНЗЫ БрБ-2, СОСТАРЕННОЙ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2023 г. Ю. В. Осинская^{а, *}, А. В. Покоев^а, С. В. Дивинский^{а, b}, С. Г. Магамедова^{а, **}

^аСамарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара, 443086 Россия

^bИнститут физики материалов, Университет Мюнстера,
Мюнстер, 48149 Германия

*e-mail: oju76@mail.ru

**e-mail: ShakhbanovaSel@mail.ru

Поступила в редакцию 07.06.2022 г.

После доработки 14.08.2022 г.

Принята к публикации 14.08.2022 г.

Работа посвящена магнитным свойствам и микротвердости бериллиевой бронзы БрБ-2. Впервые с использованием просвечивающей электронной микроскопии исследовано влияние температуры старения и приложенного постоянного магнитного поля на старение бериллиевой бронзы БрБ-2. Образцы выдерживали в течение 0.33 ч при температуре 800°C, далее закаливали быстрым погружением в воду (20°C) и подвергали искусственному старению при температурах 250–500°C в течение 1 ч в постоянном магнитном поле напряженностью 557.2 кА/м и без него. Обнаружен отрицательный магнитопластический эффект, приводящий к увеличению микротвердости бериллиевой бронзы БрБ-2 до ~38% от исходного значения. Установлено наличие упрочняющей фазы γ -Cu₃Be, играющей большую роль в формировании прочностных свойств сплава. Наложение постоянного магнитного поля приводит к активизации процесса старения. При наложении постоянного магнитного поля обнаружена тенденция перехода сплава от диамагнитного состояния к суперпарамагнитному.

Ключевые слова: бериллиевая бронза БрБ-2, постоянное магнитное поле, старение, микротвердость, магнитопластический эффект, магнитные свойства, просвечивающая электронная микроскопия.

DOI: 10.31857/S1028096023030123, **EDN:** LFGSJJ

ВВЕДЕНИЕ

Одной из современных задач физики твердого тела и материаловедения является выявление закономерностей изменения физико-механических свойств и характеристик металлического сплава, таких как пластичность и прочность, в зависимости от его структуры и фазового состояния [1–3]. Существенно изменить такие свойства позволяют технологии термической обработки: старение, отжиг, отпуск, нормализация и так далее. В процессе старения закаленного сплава происходит распад пересыщенного твердого раствора и образование включений других фаз. Появление таких выделений тормозит движение дислокаций, что приводит к изменению физико-механических свойств сплава, таких как микротвердость, прочность и пластичность [4].

Ранее установлено [5–9], что при искусственном старении закаленного технического сплава бериллиевой бронзы БрБ-2 в постоянном магнитном поле увеличение микротвердости может

достигать ~38% от исходного значения. Поскольку пластичность сплава при этих условиях уменьшается, наблюдаемый эффект можно определить как “отрицательный” магнитопластический эффект [10]. До сих пор не ясна физическая природа этого эффекта в металлическом сплаве. Интересно то, что бериллиевая бронза БрБ-2, являясь типичным диамагнетиком, так сильно реагирует на приложенное постоянное магнитное поле в процессе старения сплава. Таким образом, целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование влияния постоянного магнитного поля и температуры старения на микротвердость, фазообразование и магнитные свойства бериллиевой бронзы БрБ-2.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Состав исследованной бериллиевой бронзы БрБ-2, представлен в табл. 1. Режимы закалки и старения сплава выбирали на основе литературных данных [11] и результатов ранее проведенных

Таблица 1. Состав бериллиевой бронзы БрБ-2

Элемент		Максимальное содержание в сплаве, %
Основные элементы сплава	Cu	97.49
	Be	2.08
	Ni	0.31
Примеси	Si	0.09
	Al	0.01
	Mg	0.02
	Fe	—(<0.001)

Таблица 2. Режимы термоманитной обработки бериллиевой бронзы БрБ-2. Все образцы были подвержены закалке при 800°C в течение 20 мин в воду (20°C), после чего проведен отжиг в течение 1 ч

Температура отжига T , °C	Напряженность магнитного поля H , кА/м
250	0
	557.2
300	0
	557.2
325	0
	557.2
350	0
	557.2
400	0
	557.2
450	0
	557.2
500	0
	557.2

исследований [5–9]. После выдержки 0.33 ч при температуре 800°C образцы закаливали быстрым погружением в воду температурой 20°C. Старение образцов в постоянном магнитном поле напряженностью 557.2 кА/м проводили на уникальной установке для отжига “ПМП-2” [12] в вакууме $\sim 10^{-2}$ Па. Напряженность поля измеряли и контролировали с точностью до 1%, неоднородность поля составляла менее 5%. Напряженность постоянного магнитного поля была направлена перпендикулярно поверхности образца. Температуру измеряли Pt/Pt(Rh) термопарой и поддерживали на заданном уровне с точностью $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Режимы термоманитной обработки приведены в табл. 2. Согласно диаграмме фазовых состояний Cu–Be [13] при 800°C содержание бериллия в сплаве составляет ~ 12 ат. %, что соответствует состояниям пересыщенного твердого раствора, поскольку растворимость бериллия при температурах от 300 до 400°C ограничивается $\sim 2\text{--}3$ ат. %.

Микротвердость образцов измеряли с помощью микротвердомера HAUSER при нагрузке 100 г и времени нагружения 7 с. Каждое значение микротвердости получали усреднением по 20 измерениям. Относительная ошибка определения среднего значения микротвердости составила 3–5%.

Фазообразование наблюдали методом тонких фольг на просвет [14–16] на просвечивающем электронном микроскопе “ЭМ-200”. Чувствительность методов, использующих взаимодействие электронов с веществом, на несколько порядков превосходит таковую для методов на основе взаимодействия рентгеновских лучей или нейтронов. Поэтому при съемке на просвет с помощью электронов можно исследовать очень тонкие объекты ($10^{-5}\text{--}10^{-7}$ см). Важнейшим обстоятельством является то, что на изображении кристалла возникает более или менее резкий дифракционный контраст везде, где присутствуют какие-либо искажения кристаллической решетки.

ки, вызванные присутствием тех или иных дефектов: дислокаций, дефектов упаковки, границ зерен и блоков, включений или зон Гинье—Престона.

Магнитные свойства (реакция на изменение внешнего магнитного поля, намагничивание при изменении температуры) бериллиевой бронзы БрБ-2 были измерены с помощью системы измерения физических свойств в магнитометре с вибрирующим образцом. В настоящей работе использовали установку Quantum Design PPMS-6000 EverCool II (г. Мюнстер, Германия). Все измерения проводили при давлении 10^{-4} мБар. Для измерения магнитных свойств в магнитометре с вибрирующим образцом, образец помещали в держатель из материала, который имеет низкую намагниченность. В качестве держателя использовали стеклянную трубку. Электромагнит вызывает индуцированное магнитное поле внутри образца, который периодически подвергается вибрации в вертикальном направлении (перпендикулярном вектору напряженности магнитного поля). Это движение приводит к изменению магнитного потока, что вызывает индуцированное напряжение в измерительных катушках. Напряженность индуцированного магнитного поля пропорциональна магнитному моменту образца.

Были выполнены два вида измерений. Сначала измеряли реакцию образца на различное магнитное поле. Магнитное поле принимало значение ± 1 Тл. Это измерение было выполнено при комнатной температуре и при $T = 10$ К. Второе измерение — это реакция на изменение температуры (комнатной и 10 К) при воздействии внешнего магнитного поля в 1 Тл. Для использованной установки размеры образца составляли $6 \times 3 \times 3$ мм, поскольку магнитное поле, создаваемое электромагнитом, теряет свою однородность за пределами этой области. В ходе эксперимента часть образцов были подвергнуты очистке от ферромагнитных примесей (резка ножницами) с помощью промывки в азотной кислоте, а часть образцов в связи с малостью их размеров не позволила осуществить этот процесс.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты влияния температуры старения и постоянного магнитного поля на микротвердость бериллиевой бронзы БрБ-2 представлены в табл. 3, а также наглядно изображены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что после закалки значение микротвердости составило 1313 МПа. Полученное значение микротвердости согласуется с литературными данными [11], что свидетельствует о достоверности результатов настоящей работы.

После старения без наложения постоянного магнитного поля (рис. 1) микротвердость образца увеличилась при всех температурах 250–500°C,

прирост составил до 230% по сравнению с закаленным состоянием. Это объясняется тем, что при старении бериллиевой бронзы БрБ-2 выделяются фазы (в частности, γ -CuBe), которые тормозят движение дислокаций и тем самым приводят к возрастанию прочностных свойств сплава [17, 18]. Максимальное значение микротвердости было достигнуто при 350°C и составило 3989 МПа. Такое изменение микротвердости после старения без магнитного поля, позволяет сделать вывод, что основная доля процесса старения завершается после 350°C, а при температурах выше 400°C идет процесс перестаривания, приводящий к уменьшению микротвердости.

Наложение постоянного магнитного поля напряженностью 557.2 кА/м при тех же режимах термической обработки привело к возрастанию микротвердости образцов по сравнению с состаренными без постоянного магнитного поля до ~38%. Наблюдается отрицательный магнитопластический эффект [1–3, 10]. Полученное увеличение микротвердости в совокупности с литературными данными [11] можно объяснить активизацией процесса старения при наложении постоянного магнитного поля и формированием более однородной мелкодисперсной структуры сплава. Характер зависимостей от температуры старения не изменяется, что говорит о том, что постоянное магнитное поле не меняет стадийности процесса старения.

Таким образом, можно сделать вывод, что оптимальным режимом термомагнитной обработки бериллиевой бронзы БрБ-2 является старение при температуре 350°C и напряженности постоянного магнитного поля 557.2 кА/м в течение 1 ч, поскольку в этих условиях достигаются наиболее высокие значения физико-механических характеристик сплава, в частности микротвердости [19].

Метод тонких фольг на просвет был применен для анализа структуры и фазового состава бериллиевой бронзы БрБ-2 до и после термической и термомагнитной обработок (рис. 2, 3). Измерения проводили в следующих режимах: температура старения — 300, 350 и 400°C; время старения — 1 ч; напряженность постоянного магнитного поля — 557.2 кА/м и без него.

В закаленном состоянии структура сплава представляет собой твердый раствор Be—Cu на основе α -фазы меди с четкими границами зерен (рис. 2а). Расшифровка электронограммы показала наличие кристаллической ГЦК-решетки на основе меди (рис. 3а, табл. 4).

С целью сравнения структуры сплава после обработки в оптимальном режиме (температура старения 350°C) был выбран температурный интервал вблизи этого режима, а именно температуры старения 300 и 400°C.

Таблица 3. Результаты измерения температурной зависимости микротвердости (H_μ) бериллиевой бронзы БрБ-2

Условия обработки образцов	Температура отжига T , °C	Напряженность магнитного поля H , кА/м	Микротвердость H_μ , МПа	Относительное изменение микротвердости под действием магнитного поля $(H_{\mu, H \neq 0} - H_{\mu, H = 0}) / H_{\mu, H = 0}$, %
Закалка при 800°C (20 мин) в воду (20°C)	—	—	1313 ± 29	—
Отжиг в течение 1 ч	250	0 557.2	1744 ± 49 1911 ± 39	10
	300	0 557.2	2871 ± 59 3949 ± 39	38
	325	0 557.2	3675 ± 98 4087 ± 108	11
	350	0 557.2	3989 ± 196 4194 ± 196	5
	400	0 557.2	2852 ± 69 3734 ± 69	30
	450	0 557.2	1980 ± 39 2205 ± 29	11
	500	0 557.2	1901 ± 59 1999 ± 29	5

В литературе имеются данные [4], что в результате старения бериллиевой бронзы БрБ-2 без наложения постоянного магнитного поля на первом этапе выделяются образования, подобные зонам Гинье—Престона, которые представляют собой тонкие упорядоченные области, насыщенные бериллием. Эти области размером порядка 0.1 мкм имеют вид пластинок, когерентно связанных с матрицей основного компонента. Эти выделения в общем случае могут представлять собой мелкодисперсную систему, равномерно распре-

деленную по всему объему образца, которая приводит к упрочнению сплава.

Анализ структуры сплава, состаренного при температуре 300°C, в течение 1 ч, в отсутствии постоянного магнитного поля, показывает, что структура претерпевает существенные изменения: возникает тенденция к образованию модулированной структуры (рис. 2б). Результаты анализа электронограмм (рис. 3б) показали, что матрица образца представляет собой преимущественно однородный твердый раствор бериллия в α -фазе меди. В то же время присутствуют “тяжи” у основных рефлексов, которые свидетельствуют о наличии тонких дефектных участков, возможно когерентных выделений, представляющих собой зарождающиеся зоны Гинье—Престона.

Наложение постоянного магнитного поля при этом режиме термической обработки образцов приводит к активизации процесса распада твердого раствора бериллия на основе α -фазы меди. Мелкодисперсные выделения приобретают определенную ориентацию (рис. 2в), а расшифровка электронограмм (рис. 3в) показывает, что в данном случае выделяется фаза γ -CuBe, имеющая ОЦК-решетку. Наличие “тяжей” у основных рефлексов свидетельствует о присутствии высокой объемной доли обогащенных областей, представляющих собой фазу γ -CuBe.

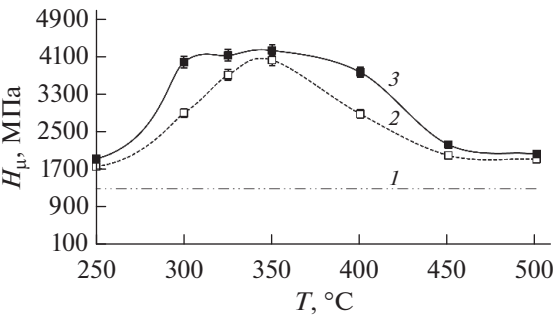


Рис. 1. Температурная зависимость микротвердости бериллиевой бронзы БрБ-2 после закалки, без старения (1); после закалки и старения без приложения магнитного поля (2) и магнитном поле напряженностью $H = 557.2$ кА/м (3).

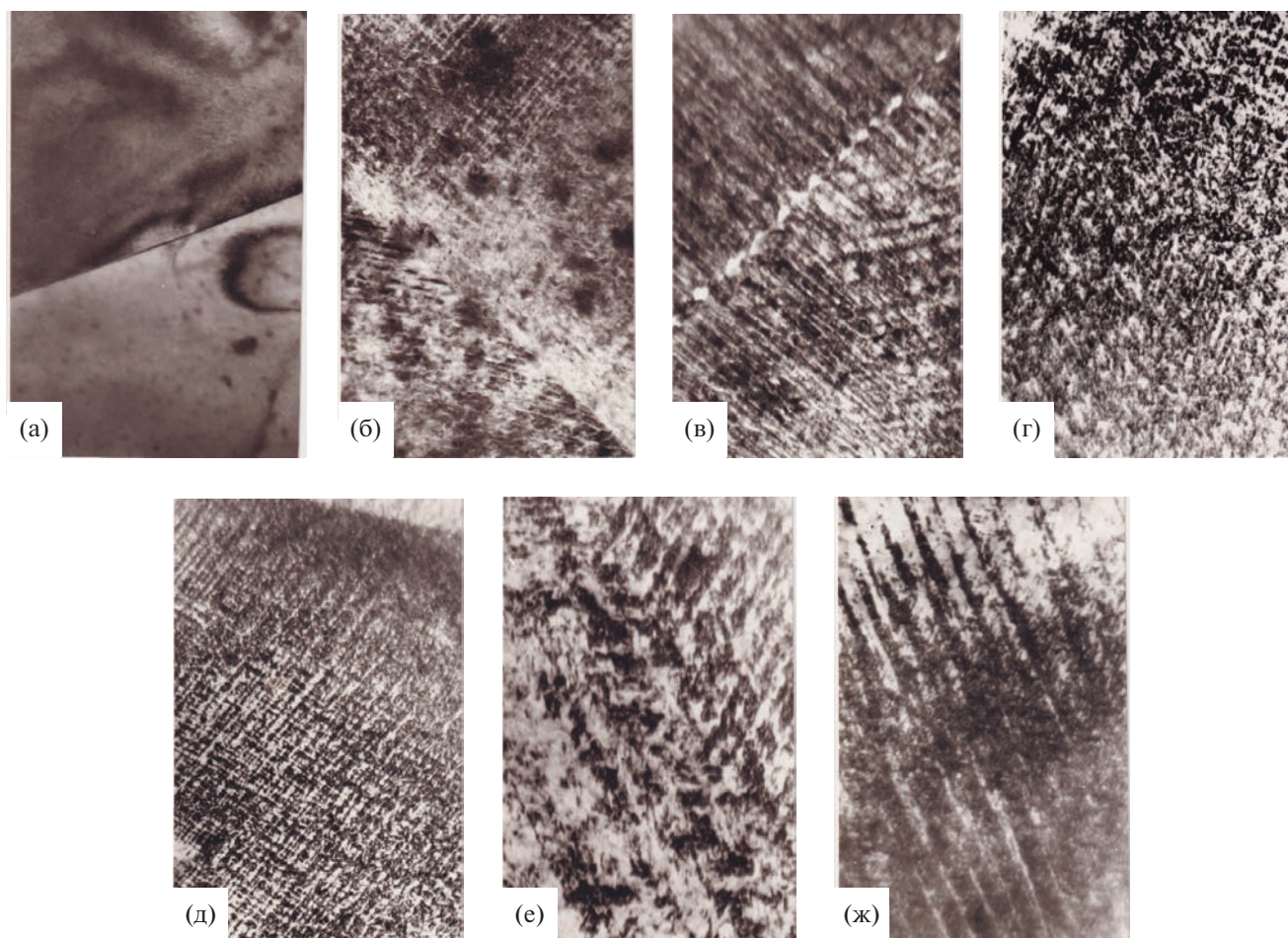


Рис. 2. Типичная структура бериллиевой бронзы БрБ-2 при закалке (а), отжиге при температурах 300 (б, в), 350 (г, д), 400°C (е, ж) с наложением постоянного магнитного поля (в, д, ж) и в его отсутствии (б, г, е), снятые с увеличением 20000 раз.

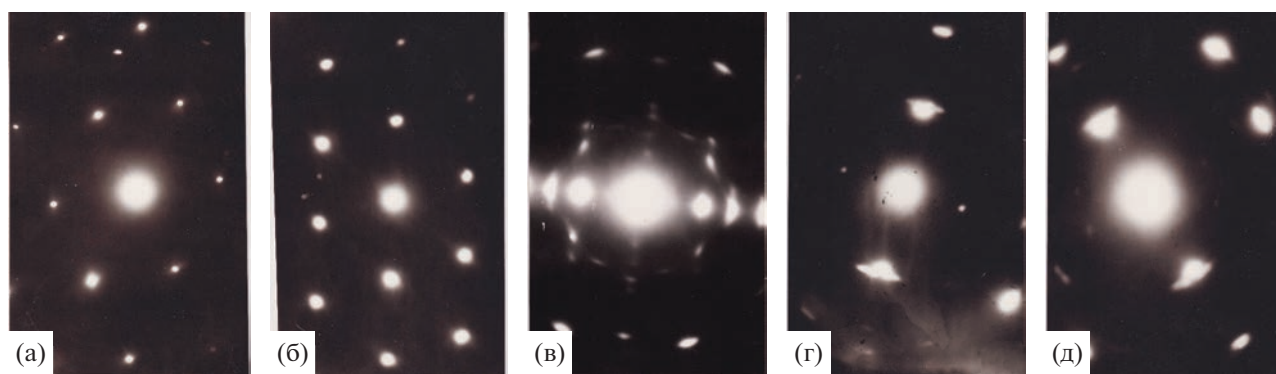


Рис. 3. Электронограммы бериллиевой бронзы БрБ-2 при закалке (а), отжиге при температурах 300 (б, в), 350 (г, д), 400°C (е, ж) с наложением постоянного магнитного поля (в, д, ж) и в его отсутствие (б, г, е).

Увеличение температуры старения образцов до 350°C приводит к максимальному распаду твердого раствора α -CuBe, процесс выделения других фаз происходит более интенсивно (рис. 2г), что подтверждается данными электронографии

(рис. 3г, табл. 5) и увеличением микротвердости по сравнению с закаленным состоянием.

Наложение постоянного магнитного поля при этом режиме термической обработки оказывает активное воздействие на структуру и свойства

Таблица 4. Результаты расшифровки электронограммы образца бериллиевой бронзы БрБ-2 после закалки при 800°C в воду 20°C*

№	r , мм	Постоянная прибора λL	$(d)_{\text{изм}}$, Å	$(d)_{\text{табл}}$, Å	Фаза	HKL
1	24.0	50.5	2.104	2.087	α -Cu	111
2	28.0		1.803	1.808	α -Cu	200
3	39.5		1.278	1.278	α -Cu	220
4	47.0		1.074	1.089	α -Cu	311
5	48.2		1.047	1.044	α -Cu	222

* Примечание: В табл. 4–6 r – расстояние от рефлекса HKL до следа первичного пучка (или центра электронограммы), № – номер рефлекса, постоянная прибора λL (λ – длина волны ионизирующего излучения, L – эффективная длина дифракционной камеры), d – межплоскостное расстояние.

Таблица 5. Результаты расшифровки электронограммы образца бериллиевой бронзы БрБ-2 после старения при $T = 350^\circ\text{C}$ в течение $t = 1$ ч без постоянного магнитного поля

№	r , мм	Постоянная прибора λL	$(d)_{\text{изм}}$, Å	$(d)_{\text{табл}}$, Å	Фаза	HKL
1	17.5	47.7	2.725	2.728	γ -CuBe	100
2	22.8		2.092	2.087	α -Cu	111
3	24.8		1.923	1.930	γ -CuBe	110
4	25.9		1.841	1.808	α -Cu	200
5	43.4		1.099	1.105	γ -CuBe	211
6	46.0		1.036	1.043	α -Cu	222

сплава. Выбранные условия обработки образца приводят к возникновению модулированной структуры (рис. 2д), частицы других фаз распределены на некотором расстоянии друг от друга, микротвердость образца принимает максимальное значение. Сказанное выше подтверждает расшифровка электронограммы (рис. 3д, табл. 6), которая показывает наличие собственных рефлексов фазы γ -CuBe, что свидетельствует о частичном когерентных выделениях в матрице сплава.

Дальнейшее увеличение температуры старения образца до 400°C приводит к стабилизации структуры, связанной со снятием напряжений в сплаве и процессами полигонизации, что приводит к уменьшению микротвердости, увеличению размеров выделившихся частиц и появлению пре-

имущественного направления выделений (рис. 2е), расшифровка электронограммы подтверждает, что фазовый состав не меняется (рис. 3е). Наложение постоянного магнитного поля в данном случае не приводит к существенным изменениям в структуре (рис. 2ж, 3ж).

Таким образом, методом электронной микроскопии наглядно показано выделение упрочняющей фазы γ -CuBe и образование модулированной структуры, следствием чего является достижение максимальных значений микротвердости. Кроме этого, при обработке в постоянном магнитном поле происходит активизация процесса старения по сравнению со старением без постоянного магнитного поля.

Таблица 6. Результаты расшифровки электронограммы образца бериллиевой бронзы БрБ-2 после старения при $T = 350^\circ\text{C}$ в течение $t = 1$ ч, при $H = 557.2$ кА/м

№	r , мм	Постоянная прибора λL	$(d)_{\text{изм}}$, Å	$(d)_{\text{табл}}$, Å	Фаза	HKL
1	18.0	49.5	2.750	2.728	γ -CuBe	100
2	23.7		2.088	2.087	α -Cu	111
3	25.8		1.918	1.930	γ -CuBe	110
4	31.5		1.571	1.567	γ -CuBe	111
5	38.6		1.282	1.278	α -Cu	220
6	45.5		1.087	1.084	α -Cu	311
7	47.5		1.042	1.044	α -Cu	222

Таблица 7. Расчетные значения коэрцитивной силы H_c , магнитного момента M_R , магнитной восприимчивости χ образца бериллиевой бронзы БрБ-2

Условия измерений	Величина	325°C ($H \neq 0$, не очищенный)	325°C ($H \neq 0$, очищенный)	350°C ($H \neq 0$, не очищенный)
Комнатная температура	H_c	(113 ± 75)	—	(288 ± 100)
	$M_R, \times 10^{-6}$ ед. СГС	(1.6 ± 0.5)	—	(26.9 ± 75)
	$\chi, \times 10^{-9}$ ед. СГС/кЭ	(-7.73 ± 0.03)	(-6.90 ± 0.30)	(-21 ± 0.39)
10 К	H_c	(263 ± 175)	—	(575 ± 75)
	$M_R, \times 10^{-6}$ ед. СГС	(4.1 ± 1.3)	—	(40 ± 10)
	$\chi, \times 10^{-9}$ ед. СГС/кЭ	(-5.20 ± 0.04)	(-5.34 ± 0.05)	(22.30 ± 0.09)

Анализ полученных результатов измерений и расчетов магнитных свойств (коэрцитивной силы H_c , магнитного момента M_R , магнитной восприимчивости χ) бериллиевой бронзы БрБ-2 после термической и термомагнитной обработок (табл. 7) показал, что значения коэрцитивной силы (H_c) увеличиваются с ростом температуры старения, как в случае измерений комнатной температуре, так и при 10 К. Кроме этого, из табл. 7 видно, что полученный при температуре 10 К магнитный момент (M_R) сплава, состаренного при температуре 350°C, в 10 раз больше, чем состаренного при температуре 325°C, а M_R , полученный при комнатной температуре, в 17 раз больше. В свою очередь, магнитная восприимчивость сплава, состаренного при температуре 325°C, принимает значение примерно равные магнитной восприимчивости чистой меди (-9.6×10^{-6}), однако для сплава, состаренного при температуре 350°C, ее значение возрастает больше, чем в 2 раза, а при температуре эксперимента 10 К она принимает положительное значение, что соответствует парамагнитному состоянию.

Полученные результаты позволяют предположить, что существует тенденция перехода сплава от диамагнитного состояния к суперпарамагнитному поведению. Это может быть связано с наличием дислокаций, парных атомных комплексов медь—бериллий, примесей (Ni и его соединений с Be). Каждый из указанных объектов может обладать парамагнитным моментом, который при включении постоянного магнитного поля вносит положительный парамагнитный вклад в общую намагниченность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов по измерению микротвердости бериллиевой бронзы БрБ-2 после старения в различных термических и термомагнитных режимах позволяет сделать следующие выводы.

Измерения микротвердости бериллиевой бронзы БрБ-2, состаренной при наложении постоянного магнитного поля позволили выявить возникновение отрицательного магнитоэластического эффекта, приводящего к увеличению микротвердости сплава на ~38%. Полученный эффект обусловлен активизацией процесса старения при наложении постоянного магнитного поля и формированием более однородной мелкодисперсной структуры сплава.

Было установлено, что оптимальным режимом термомагнитной обработки бериллиевой бронзы БрБ-2 является старение при температуре 350°C в течение 1 ч и при напряженности постоянного магнитного поля 557.2 кА/м. Выяснено, что при этих условиях достигаются наиболее высокие значения физико-механических свойств сплава, в частности микротвердости.

Методом электронной микроскопии наглядно показано, что при наложении постоянного магнитного поля выделения упрочняющей фазы γ -CuBe и образование направленной модулированной структуры, следствием чего является достижение максимальных значений микротвердости. Кроме этого, при наличии постоянного магнитного поля происходит активизация процесса старения по сравнению со старением без постоянного магнитного поля.

Обнаружена тенденция перехода от диамагнитного состояния образцов к суперпарамагнитному поведению. Это может быть связано с наличием дислокаций, парных атомных комплексов медь—бериллий, примесей. Каждый из указанных объектов может обладать парамагнитным моментом, который при включении постоянного магнитного поля вносит положительный парамагнитный вклад в общую намагниченность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В. и др. // Кристаллография. 2003. Т. 48. С. 838.
2. Головин Ю.И. // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 5. С. 769.

3. Моргунов Р.Б. // УФН. 2004. Т. 174. № 2. С. 131.
4. Бунин К.П., Баранов А.А. Металлография. М.: Металлургия, 1970. 254 с.
5. Осинская Ю.В., Покоев А.В. // Материаловедение. 2005. № 11. С. 2.
6. Осинская Ю.В., Петров С.С., Покоев А.В. и др. // ФТТ. 2012. № Т. 54. № 3. С. 531.
7. Осинская Ю.В., Покоев А.В., Петров С.С. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 5–1. С. 56.
8. Осинская Ю.В., Покоев А.В. // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 3. С. 18.
9. Пост Р., Осинская Ю.В., Вильде Г. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 5. С. 36.
10. Молоцкий М.И. // Физика тв. тела. 1991. Т. 33. Вып. 10. С. 3112.
11. Тофпенц Р.Л. Разупрочняющие процессы в стареющих сплавах. Минск: Наука и техника, 1979. 184 с.
12. Миронов В.М., Покоев А.В. Камера для отжига в магнитном поле // Технология получения и исследования порошковых материалов с особыми свойствами: Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1983. С. 98.
13. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 1 / Под общ. ред. Лякишева Н.П. М.: Машиностроение, 1996. 567 с.
14. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973. 583 с.
15. Томас Г. Электронная микроскопия металлов. Прямое исследование металлов в просвечивающем электронном микроскопе. М.: ИЛ, 1963. 351 с.
16. Эндрюс К., Дайсон Д., Киоун С. Электронограммы и их интерпретация. М.: Мир, 1971. 256 с.
17. Старение сплавов / Ред. Миркина Л.И. М.: Металлургиздат, 1962. 493 с.
18. Чуистов К.В. Старение металлических сплавов. Киев: Наук. Думка, 1985. 230 с.
19. Покоев А.В., Осинская Ю.В. // Патент РФ № 2401879 от 11.08.2008 г.

Magnetic Properties of Beryllium Bronze BrB-2 Aged in a Constant Magnetic Field

Yu. V. Osinskaya^{1, *}, A. V. Pokoev¹, S. V. Divinsky^{1, 2}, S. G. Magamedova^{1, **}

¹Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, 443086 Russia

²Institute for Materials Physics, University of Münster, Munster, 48149 Germany

*e-mail: ojuv76@mail.ru

**e-mail: ShakhbanovaSel@mail.ru

For the first time, the influence of the aging temperature and the applied constant magnetic field on the aging of beryllium bronze BrB-2 has been studied by methods of microhardness, transmission electron microscopy and measurements of magnetic properties. Samples of beryllium bronze BrB-2 were kept for 0.33 h at a temperature of 800°C, then quenched by rapid immersion in water (20°C) and subjected to artificial aging at temperatures of 250–500°C for 1 h in a PMF with a strength of 557.2 kA/m and without him. A negative magnetoplastic effect was found, leading to an increase in microhardness up to ~30%. The presence of the strengthening phase α -CuBe, which plays a large role in the formation of the strength properties of the alloy, is established, and the imposition of the constant magnetic field leads to the activation of the aging process. When the constant magnetic field is applied, a tendency is observed for the transition of the alloy from the diamagnetic state to the superparamagnetic state.

Keywords: beryllium bronze BrB-2, constant magnetic field, aging, microhardness, magnetoplastic effect, magnetic properties, transmission electron microscopy, phase.