

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАРЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВОЙ БРОНЗЫ БРБ–2 В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ¹

© 2001 Ю.В. Осинская, А.В. Покоев²

Методом микротвердости, металлографии, электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и диффузного фона рассеяния рентгеновских лучей выполнено комплексное исследование влияния постоянного магнитного поля на процесс старения бериллиевой бронзы БрБ–2. Предложен оптимальный режим терромагнитной обработки.

Введение

Одним из современных и эффективных методов термообработки металлических сплавов, которым существенно удается повысить их прочность, является технология искусственного старения в условиях наложения внешних воздействий. В этом смысле возможности терромагнитной обработки в постоянном магнитном поле (ПМП) как способа контролируемого воздействия и модификации свойств сплавов остаются далеко невыясненными. В связи с появлением новых количественных научных данных о влиянии ПМП на диффузию в порошковых, поли- и монокристаллических веществах [1] возникает необходимость в прикладном использовании этого эффекта. Очень интересным с точки зрения физики является тот факт, что такой сплав, как бериллиевая бронза, являясь типичным диамагнетиком, заметно реагирует на приложенное магнитное поле при искусственном старении, проявляя при этом существенное изменение физико-механических свойств (например, микротвердости).

Целью настоящей работы было комплексное экспериментальное исследование кинетики влияния ПМП на процесс старения бериллиевой бронзы БрБ–2 и разработка на основе полученных экспериментальных и литературных данных оптимальных режимов терромагнитной обработки.

Методика и результаты измерений

В качестве объекта исследования была выбрана бериллиевая бронза БрБ–2 (сплав Be — 1.9 вес.%, Ni — 0.2–0.5 вес.%, Cu — остальное), который широко используется

¹Представлена доктором физико-математических наук профессором В. А. Салеевым.

²Осинская Юлия Владимировна (ojv@ssu.samaga.ru), Покоев Александр Владимирович (pokoev@ssu.samaga.ru), кафедра физики твердого тела и неравновесных систем Самарского государственного университета, 443011, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

для изготовления узлов и деталей в медицинской технике, от материала которых требуется высокая устойчивость против коррозии, высокие прочностные и упругие свойства.

На основе литературных данных [2] и ранее проведенных предварительных исследований [3], для изучения влияния ПМП на свойства сплава, образцы из бериллиевой бронзы БрБ-2 после закалки с 800°C в воду отжигали с целью старения в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па. Были выбраны следующие режимы старения: температура старения — $300, 325, 350, 400$ и 450°C , время отжига от 10 до 120 мин — в ПМП с напряженностью от 0 до 7 кЭ.

Для изучения старения сплава БрБ-2 в ПМП использовали комплекс физических методов исследования: метод микротвердости, металлография, электронная микроскопия, рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ, метод диффузного фона рассеяния рентгеновских лучей. Ниже приводятся основные экспериментальные данные, полученные этими методами.

Микротвердость измерялась с помощью микротвердомера HAUSER при нагрузке 50 г и времени нагружения 15 с. На рис. 1 представлены результаты измерений микротвердости образцов в закаленном (исходном) состоянии, а также после термической и термомагнитной обработки для температур $300, 325, 350, 400$ и 450°C .

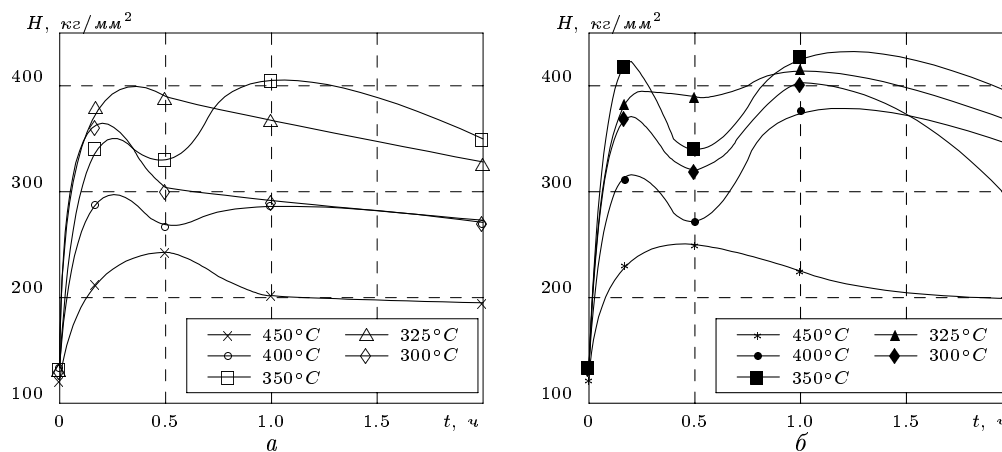


Рис. 1. Зависимость микротвердости от времени отжига при разных температурах: а — без наложения поля, б — с наложением поля напряженностью 7 кЭ

Каждое значение микротвердости было получено усреднением по 10 – 13 измерениям. Относительная среднеквадратичная ошибка отдельного измерения составляла ~ 5 – 15 %, а среднеквадратичная ошибка среднего значения микротвердости — ~ 2 – 5 %. Среднее значение микротвердости в закаленном состоянии составляло 132 ± 3 kg/mm^2 .

После отжига без поля длительностью 0.17 ч при температурах $300, 325, 350, 400$ и 450°C микротвердость резко увеличивается от 132 kg/mm^2 до $364, 371, 343, 292, 217$ kg/mm^2 соответственно. Дальнейшее увеличение отжига от 0.17 до 0.5 ч приводит к спаду микротвердости до $304, 360, 331, 261$ kg/mm^2 для температур $300, 325, 350, 400^{\circ}\text{C}$ соответственно. При 450°C микротвердость продолжает расти до 240 kg/mm^2 , а лишь затем происходит ее спад. Такое изменение микротвердости после отжига для температур $300, 325, 350$ и 400°C без поля позволяет сделать вывод, что основная доля процесса старения завершается в течение первых 10 – 15 минут отжига, а дальнейший отжиг приводит к стабилизации структуры за счет

процессов полигонизации, фазового старения и совершенствования тонкой структуры сплава. Таким образом, выбрав кратковременные отжиги, нам удалось выяснить особенности кинетики изменения микротвердости от времени отжига.

Приведенные значения микротвердости при отжигах без ПМП хорошо согласуются с литературными данными [2], что свидетельствует о повторяемости и достоверности результатов. Наложение магнитного поля с напряженностью 7 кЭ на те же режимы термической обработки во всех случаях приводит к еще большему возрастанию микротвердости образцов.

Наибольшее значение микротвердости наблюдается после отжига 1 ч в ПМП, которое составляет 403 кг/мм^2 при температуре 300°C ($416, 428, 291 \text{ кг/мм}^2$ при температурах $325, 350, 400^\circ\text{C}$ соответственно). Дальнейшее увеличение температуры отжига приводит к завершению процесса старения, что уже хорошо наблюдается при температуре 450°C . Можно сделать вывод, что оптимальным режимом термомагнитной обработки является отжиг при температуре 350°C , времени отжига 1 ч и поле напряженностью 7 кЭ . Это утверждение было подтверждено другими методами комплексного исследования, результаты которых приводятся ниже.

Металлографические снимки образцов, отожженных в течение $0.17\text{--}2 \text{ ч}$ при температуре 350°C без поля, показывают, что макроструктура сплава после отжига не претерпевает существенные изменения: форма и размер зерен изменяются незначительно с увеличением времени отжига. В теле отдельных зерен наблюдаются двойники. Обработка реплик с поверхности образцов, отожженных без поля, показывает, что границы зерен имеют ширину $6\text{--}15 \text{ мкм}$.

Металлографические снимки образцов, отожженных в ПМП в течение $0.17\text{--}2 \text{ ч}$ при температуре 350°C , не выявляют существенного влияния ПМП на макроструктуру зерен. Однако обработка реплик с поверхности образцов, отожженных в ПМП, свидетельствует о более равномерной структуре по сравнению с отжигами без поля; границы зерен становятся тоньше и четче.

В данной работе с помощью дифрактометра ДРОН-2 был выполнен рентгенофазовый анализ образцов, прошедших термическую и термомагнитную обработку. Данные показывают, что α -линии закаленного образца, который представляет собой сплав Cu с равномерно распределенными атомами Be , смещены на $11\text{--}16'$ на передних линиях и $42\text{--}54'$ на задних линиях в сторону больших углов по сравнению с соответствующими линиями чистой меди. Это связано с тем, что в решетке сплава BrB-2 более крупные атомы Cu замещены меньшими по размеру атомами Be , т.е. параметр решетки сплава меньше, чем параметр чистой Cu . Также следует отметить, что после отжигов наблюдается увеличение параметра решетки сплава, причем это увеличение в ПМП больше, чем без поля. Это говорит о том, что поле ускоряет процесс перехода атомов Be из раствора в обогащенные зоны (зоны Гинье-Престона) и, следовательно, приводит к увеличению параметра оставшегося материнского твердого раствора.

По данным рентгенофазового анализа были рассчитаны: параметр решетки материнской матрицы, концентрация Be в остаточной матрице (рис. 2) в зависимости от времени, температуры отжига и напряженности ПМП.

При расшифровке дифрактограмм выявлены линии, соответствующие $\text{Cu-Be-}\gamma$ -фазе [4] на всех отожженных образцах в поле и без него. Однако количественный анализ произвести было невозможно. Все расчеты выполнялись по задним рентгеновским линиям, так как точность расчетов по ним выше, чем по передним.

Данные по брэгговским $(111)_\alpha$ -углам отражения бронзы показывают, что термическая обработка приводит к смещению их положения в сторону меньших значений

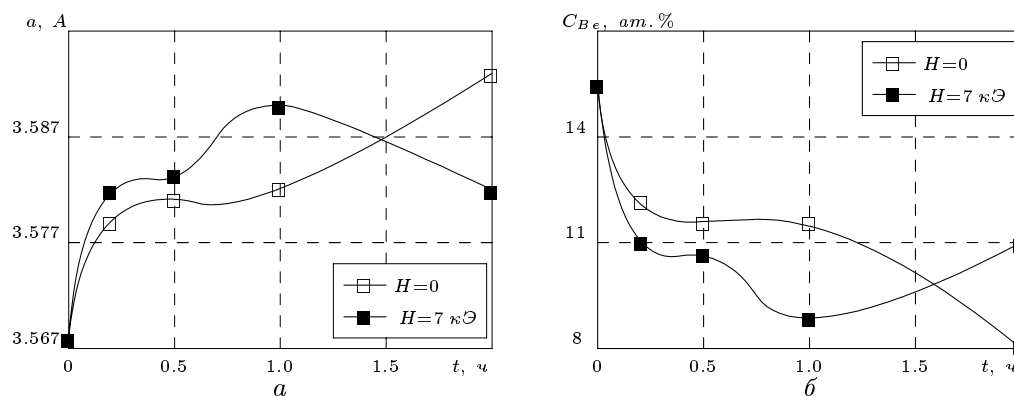


Рис. 2. Зависимость параметра решетки матрицы (а) и концентрации Ve (б) в матрице сплава БрБ-2 от времени отжига

углов при всех режимах отжига. Это свидетельствует об истощении матрицы сплава атомами Ve и переходе их в зоны обогащения. Линии второго порядка отражения появляются только после отжига в течение 1 ч. Поэтому судить о них по предыдущим отжигам нет возможности. Отсутствие этих линий при кратковременных отжигах связано с их большей чувствительностью к структурно-напряженному состоянию материала. Полученные результаты позволяют также сделать вывод, что наиболее значительные изменения в положении линии происходят при отжиге от 0.17 до 0.5 ч, т.е. в этих временных пределах происходит основная доля формирования зон обогащения.

По физическому уширению линии сплава БрБ-2 были рассчитаны параметры тонкой структуры сплава: размер когерентно-рассеивающих блоков $\langle D \rangle$, величины микроискажений $\langle \Delta d/d \rangle$, плотность дислокаций ρ после указанных режимов. Расчеты выполнялись по следующим формулам [5]:

$$\langle D \rangle = \frac{\lambda (\sin \Theta_{222} - \sin \Theta_{111})}{\cos \Theta_{111} \cos \Theta_{222} (\beta_{111} \tan \Theta_{222} - \beta_{222} \tan \Theta_{111})},$$

$$\left\langle \frac{\Delta d}{d} \right\rangle = \frac{\beta_{111} \cos \Theta_{111} \cos \Theta_{222} - \beta_{222}}{4 \tan \Theta_{111} \cos \Theta_{111} \cos \Theta_{222} - 4 \tan \Theta_{222}},$$

$$\rho = \frac{3}{\langle D \rangle^2},$$

где Θ_{111} , Θ_{222} — углы для двух порядков отражения, β_{111} , β_{222} — физические уширения линий, λ — длина волны Со-излучения.

Анализ приведенных в таблице данных свидетельствует о том, что наложение поля на отжиг приводит к формированию более равномерной фрагментированной структуры за счет дробления зерен на более мелкие блоки когерентного рассеяния.

Также в работе произведены исследования процесса старения методом измерения диффузного фона рентгеновских лучей (см. рис. 3). Измерения проводились на рентгеновском двухкристальном спектрометре в монохроматизированном излучении CoK_{α_1} . Затем данные обрабатывались по методике [6] и с помощью программы, которая рассчитывает функции радиального распределения атомов, координационные числа, средние межатомные расстояния и средние отклонения атомов от положения равновесия при тепловых колебаниях.

Таблица

Зависимость параметров тонкой структуры сплава от времени отжига
при температуре 350°C

Время отжига, τ	$D \cdot 10^4, \text{ см}$		$\rho \cdot 10^{-8}, 1/\text{см}^2$		$\Delta d/d \cdot 10^4$	
	$H = 0 \text{ КЭ}$	$H = 7 \text{ КЭ}$	$H = 0 \text{ КЭ}$	$H = 7 \text{ КЭ}$	$H = 0 \text{ КЭ}$	$H = 7 \text{ КЭ}$
0.17	-1.2	-0.9	2.1	3.7	2.1	1.7
0.5	-0.8	-0.7	4.7	6.1	1.6	1.4
1	-1.1	-1.0	2.5	3	1.3	1.1
2	-0.8	-0.8	4.7	4.7	1.2	1.2

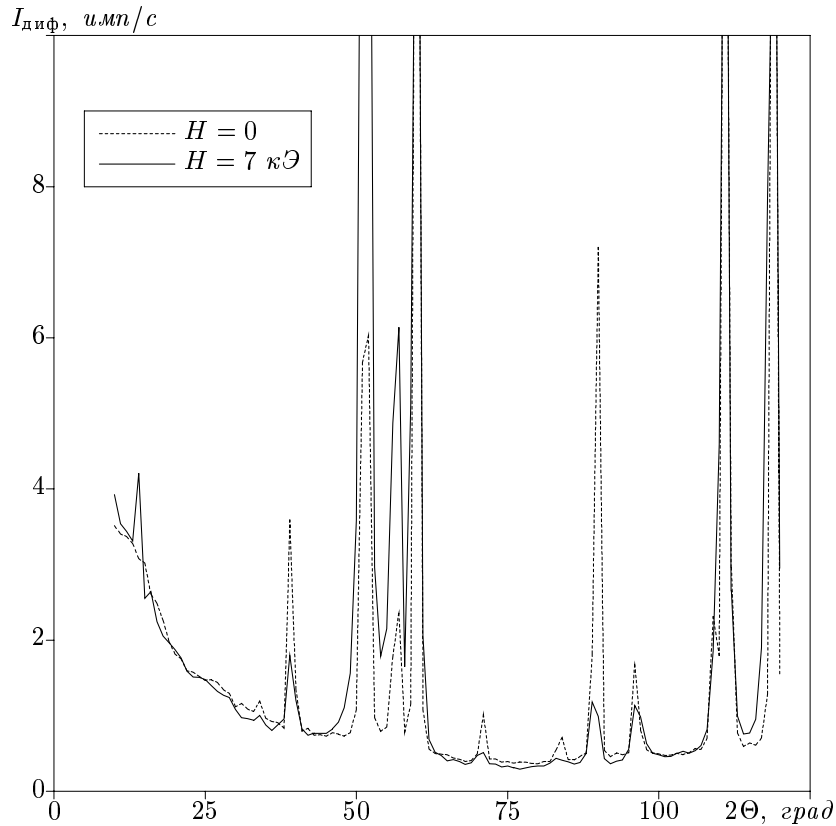


Рис. 3. Экспериментальные кривые диффузного фона

Сравнивая кривые диффузного фона, можно сделать вывод, что он весьма чувствителен к процессу старения сплава бериллиевой бронзы и его использование перспективно для дальнейших исследований процессов упорядочения структуры.

Краткие выводы

Результаты, полученные в данной работе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Наложение ПМП на процесс старения бериллиевой бронзы БрБ-2 при различ-

ных режимах термомангнитной обработки всегда приводит к формированию более равномерной структуры и увеличению микротвердости сплава по сравнению с соответствующими данными, полученными без ПМП.

2. Результаты измерений микротвердости и данные рентгеноструктурного анализа показывают, что основная доля процесса распада в твердом растворе завершается после отжига длительностью 0.17–0.5 ч.

3. Результаты комплексного исследования старения бериллиевой бронзы БрБ–2 позволяют рекомендовать оптимальный следующий режим термомангнитной обработки: температура отжига — 350°C, время отжига — 1 ч, напряженность ПМП — 7 кО.

Литература

- [1] Mironov D.V., Pokoev A.V., Stepanov D.I., Trofimov I.S. Mechanisms of the impurity diffusion in the ferromagnetic metals in the constant magnetic field// Abstract Booklet DIFTRANS-98 International Work-shop "Diffusion and diffusional phase transformations in alloys". Cherkasy, Ukraine, 1998. P. 10–20.
- [2] Тофпенек Р.Л. Разупрочняющие процессы в стареющих сплавах. Минск: Наука и техника, 1979. 184 с.
- [3] Анисович А.Г., Журавель Л.В., Покоев А.В. Влияние ПМП на старение бериллиевой бронзы БрБ–2// Взаимодействие излучения с твердым телом: Тез. докл. Междунар. конф., Минск, 1997. С. 249.
- [4] Чуистов К.В. Старение металлических сплавов. Киев: Наукова думка, 1985. 78 с.
- [5] Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н. и др. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. 623 с.
- [6] Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел: Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1980. 328 с.

THE COMPLEX INVESTIGATION OF AGING OF BERYLLIUM BRONZE BrB-2 IN THE CONSTANT MAGNETIC FIELD³

© 2001 J.V. Osinskaya, A.V. Pokoev⁴

The complex investigation of the influence of a constant magnetic field on the process of aging of beryllium bronze BrB–2 was realized by the methods of microhardness, metallography, electronic microscopy, X-ray analysis and diffuse phone method of scattered X-rays. The optimum condition of a thermomagnetic treatment is proposed.

Поступила в редакцию 21/XI/2001;
в окончательном варианте — 05/XII/2001.

³Communicated by Dr. Sci. (Phys. & Math.) Prof. V.A. Saleev.

⁴Osinskaya Julia Vladimirovna (ojv@ssu.samara.ru), Pokoev Alexander Vladimirovich (pokoev@ssu.samara.ru), Dept. of Solid State Physics and Nonequilibrium Systems, Samara State University, Samara, 443011, Russia.