

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ СТАРЕНИЯ НА МАГНИТОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В БЕРИЛЛИЕВОЙ БРОНЗЕ БрБ-2

© 2009 Ю.В. Осинская, С.С. Петров, А.В. Покоев

Самарский государственный университет

Поступила в редакцию 09.06.2009

Опыты показывают, что наложение сравнительно небольших магнитных полей может привести к изменению пластических свойства кристаллов. Это явление получило название магнитоупругого эффекта. В данной работе впервые методами микротвердости и рентгеноструктурного анализа исследована кинетика температурных, частотных и временных изменений физико-механических свойств сплава бериллиевой бронзы БрБ-2 в процессе диффузионно-контролируемого старения в импульсном магнитном поле частотой от 0 до 7 Гц с амплитудой напряженности импульса 557,2 кА/м, при температуре 300, 350 и 400 °С и длительности отжига от 0 до 2 ч. Результаты работы показывают, что импульсное магнитное поле оказывает заметное воздействие на пластические свойства бериллиевой бронзы и наблюдается положительный магнитоупругий эффект. Объяснение поведения сплава в таких условиях старения требует дальнейших экспериментальных исследований и теоретического анализа. Полученные данные дают полезную информацию для развития теоретических представлений о взаимодействии структурных и магнитных дефектов в концепции спин-зависимых реакций дефектов.

Ключевые слова: Старение, магнитоупругий эффект, бериллиевая бронза, импульсное магнитное поле, пластичность

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время получено большое число экспериментальных фактов, свидетельствующих о заметном влиянии относительно малых магнитных полей ~1 Тл на различные характеристики твердых тел: скорость микро- и макропластической деформации [1,2], предел текучести [3], рост трещин [4], внутреннее трение [5] и микротвердость [6, 7].

Хорошо известно, что искусственное старение закаленного сплава бериллиевой бронзы приводит к существенному увеличению прочностных свойств сплава – твердости и микротвердости [8, 9], которые связаны с фазовыми превращениями, выделением дисперсных фаз. Ранее в работе [7] экспериментально установлено, что постоянное магнитное поле (ПМП) существенно влияет на кинетику процесса фазового превращения в бериллиевой бронзе БрБ-2: сплав, являясь типичным диамагнетиком, заметно реагирует на приложенное в процессе искусственного старения магнитное поле и изменяет

свою микротвердость, фазовый состав и другие физико-механические свойства. Кроме того, в работе [10] методом малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов показано, что наложение ПМП на процесс старения *in situ* изменяет кинетику фазообразования этого сплава. Наблюдающийся эффект увеличения микротвердости при наложении ПМП можно определить как отрицательный магнитоупругий эффект (МПУ) [11], поскольку ПМП приводит к уменьшению пластических свойств сплава и, как следствие, увеличению прочностных. Полного объяснения полученного эффекта нет, хотя уже сейчас понятно, что оно должно быть основано на привлечении к рассмотрению электронно-спиновых характеристик дефектов, кинетики их взаимодействия между собой и с магнитным полем в процессе старения сплава [12, 13]. В этом плане представляет интерес дальнейшее изучение эффекта в других условиях и, в частности, при воздействии импульсного магнитного поля (ИМП). Из ранее выполненных работ, известно влияние ИМП на характеристики различных материалов. Так в работе [14] показано, что обработка оловянистой бронзы ИМП приводит к изменению внутреннего трения, а в работе [15] показано положительное влияние на износ материала, пластичность, а также усталостные и приборотехнические характеристики дюралюминия Д16, меди М1, латуни Л63 и бериллиевой бронзы БрБ-2. Поэтому изучение эффектов влияния ИМП на старение сплава бериллиевой

Осинская Юлия Владимировна, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела и неравновесных систем.

E-mail: oju@ssu.samara.ru.

Петров Сергей Степанович, аспирант.

E-mail: serpet1@yandex.ru.

Покоев Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела и неравновесных систем.

E-mail: pokoev@ssu.samara.ru.

бронзы БрБ-2 представляет собой несомненный интерес с практической точки зрения, поскольку в случае достижения понимания физических механизмов этого воздействия возникают перспективы разработки более совершенных технологических приемов контролируемого влияния на свойства сплава или их модифицирования. В связи с этим целью настоящей работы является комплексное экспериментальное изучение эффекта влияния температуры, времени и сравнительно низкой частоты ИМП на процесс старения бериллиевой бронзы БрБ-2 и кинетики его протекания.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование МПЭ проводили на сплаве бериллиевой бронзы БрБ-2 (Be-2.08(13.0) вес. (ат.)%, Ni-0.31(0.29) вес. (ат.)%, Si-0.09(0.18) вес. (ат.)%, Al-0.01(0.02) вес. (ат.)%, Mg-0.02(0.04) вес. (ат.)%, Cu – остальное). Режимы старения сплава БрБ-2 выбирали на основе литературных данных [8] и результатов ранее проведенных исследований процесса старения этого сплава в ПМП [7]: выдержка 30 мин при 800 °С, закалка в воду 20 °С, старение в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па при температурах – 300, 350 и 400 °С длительностью от 0 до 2 ч в ИМП с амплитудой напряженности 557,2 кА/м и частоте ИМП от 0 – 7 Гц.

Для изучения кинетики старения сплава БрБ-2 в ИМП использовали методы микротвердости и рентгеноструктурного анализа. Микротвердость определяли с помощью микротвердомера HAUSER при нагрузке 100 г и времени нагружения 10 с по 10-15 измерениям с ошибкой 2-3 %. Рентгеноструктурный анализ образцов, прошедших термическую и термомагнитную обработку, выполнен с помощью дифрактометра ДРОН-2 в Co K_α -излучении. Съемку и обработку дифрактограмм производили автоматически с помощью аппаратно-программного комплекса для управления дифрактометром и регистрации полученных результатов. Зная истинное физическое уширение вычисляли средние параметры тонкой структуры сплава – размеры когерентно-рассеивающих блоков ($\langle D \rangle$), плотность дислокаций ($\langle r \rangle$) и величину относительной микродеформации решетки ($\langle Dd/d \rangle$) [16].

ИМП создавалось электромагнитом ФЛ-1 с электронным блоком питания и управления. Форму сигнала ИМП можно описать следующим выражением:

$$H(t) = \begin{cases} H_1 \sin(2\pi\nu t), & 0 < t < t_1; \\ 0, & t_1 < t < t_1 + t_2, \end{cases} \quad (1)$$

где H_1 – амплитуда импульсной гармонической

составляющей магнитного поля, ν – частота магнитного поля, t_1 – время импульса; t_2 – время паузы (задержки импульса), $t_1/t_2 \cong 0,4 - 0,6$.

Ниже приводятся основные экспериментальные данные, полученные этими методами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 и 2 представлены результаты измерений микротвердости образцов в закаленном (исходном) состоянии, а также после термической и термомагнитной обработки для температуры 350 °С.

Для всех исследованных температур среднее значение микротвердости в закаленном состоянии составляло 100 ± 5 кГ/мм². Кроме того, приведенные значения микротвердости при старении без магнитного поля (рис. 1 и 2) хорошо согласуются с известными литературными данными [8], что также можно отнести и к другим исследованным температурам. Из рис. 1 и 2 видно, что микротвердость образцов, отожженных в ИМП, не превышает микротвердости образца, отожженного без поля, в отличие от соответствующих данных, полученных при наложении ПМП [7], где поле всегда приводило к повышению микротвердости до ~ 30 %. Подобные результаты можно наблюдать и для температур 300 и 400 °С, при них также значения микротвердости образцов, состаренных в ИМП не превышает значения микротвердости сплава, состаренного без поля. Отличие лишь в том, что уровень значений ниже по сравнению с температурой 350 °С.

Величина микротвердости образцов, отожженных в ИМП изменяется с ростом частоты. В исследованном интервале частот максимумы микротвердости ~ 347 кГ/мм² при воздействии ИМП соответствуют частотам 1 и ~ 3.5 Гц, а минимумы (~ 284 и 293 кГ/мм², соответственно) – частотам 2 и 5 Гц. Подобное изменение микротвердости образцов (рис. 1) обусловлено, возможно, тем, что полученные эффекты при частотах 2 и 5 Гц связаны с меньшей концентрацией бериллия в остаточной матрице и наличием фазовых выделений, которые, как известно, являются стопорами для движения дислокаций. Из полученных ранее экспериментальных данных и выводов работы [7] известно, что именно концентрация фазовых выделений и их размер обуславливают высокие значения микротвердости. Также изменение микротвердости может быть связано с взаимодействием дислокаций с различными структурными и магнитными дефектами и их концентрацией. Кроме этого, как показывают данные для всех исследуемых режимов старения, с увеличением температуры

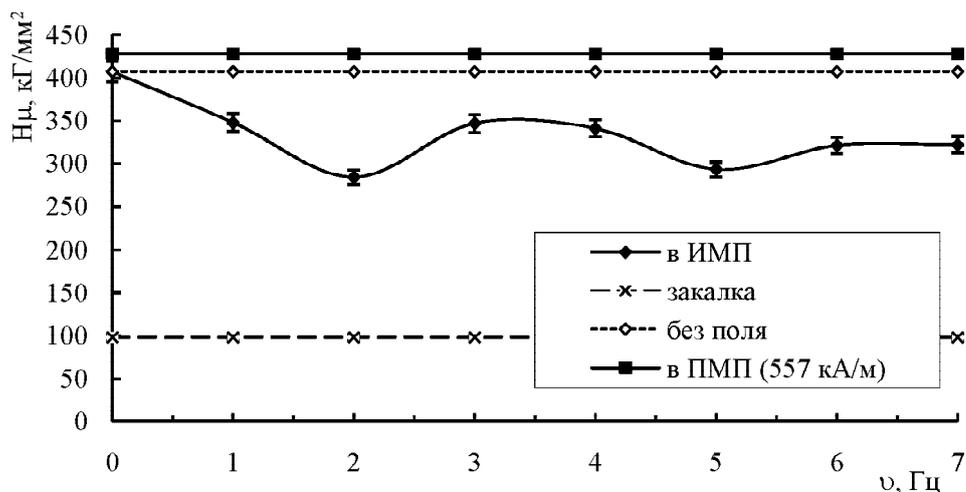


Рис. 1. Частотная зависимость микротвердости сплава при температуре старения 350 °С и времени старения 1 ч

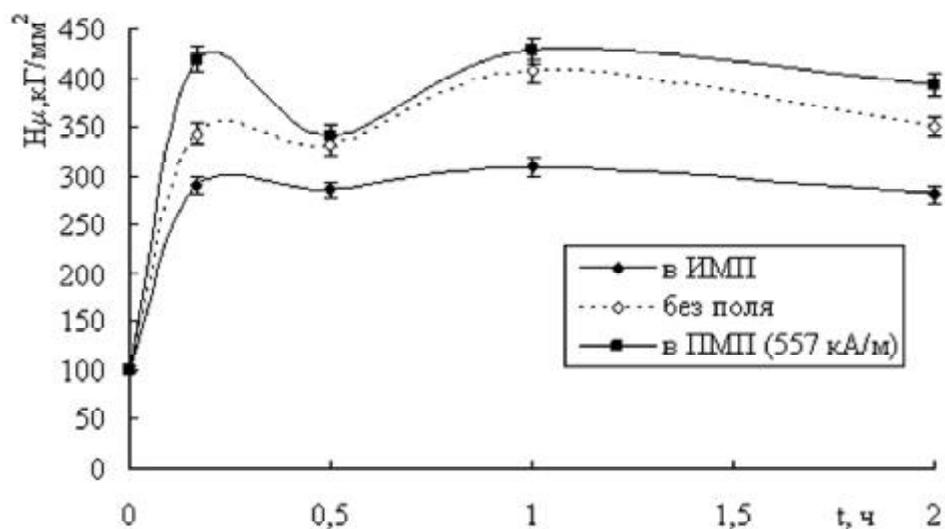


Рис. 2. Временная зависимость микротвердости сплава при температуре старения 350 °С и частоте ИМП 2 Гц

максимумы и минимумы (экстремумы) микротвердости смещаются в сторону больших частот.

На рис. 2 наблюдаемый вид временной зависимости, а именно, имеющиеся максимумы и минимумы, объясняются стадийностью процесса старения. Кроме этого, ИМП, как видно, не изменяет характера процесса старения, подобный вид кривых получен и для температур 300 и 400 °С. Вследствие этого ниже приводятся результаты преимущественно для одной температуры 350 °С.

Таким образом, согласно определению МПЭ [5], в исследованном температурном интервале наблюдается положительный МПЭ, заключающийся в уменьшении микротвердости сплава, при этом пластические свойства сплава существенным образом увеличиваются при наложении

ИМП, чего ранее не наблюдалось при наложении ПМП [7].

По рентгеновским данным были построены частотные и временные зависимости параметров тонкой структуры для образцов, состаренных в ИМП и в его отсутствие. Средняя ошибка измерений величины относительной микродеформации и среднего размера блоков когерентного рассеяния составляла ~12%, а рентгеновской плотности дислокаций – ~25%, соответственно.

На рис. 3 - 6 приведены зависимости значений $\langle D \rangle$ и $\langle c \rangle$ от частоты ИМП и времени отжига для температуры 350 °С.

Как видно из представленных рисунков при отжигах для частот ИМП 1 и ~4 Гц размер блоков когерентного рассеяния уменьшается, плотность дислокаций увеличивается, что приводит к замед-

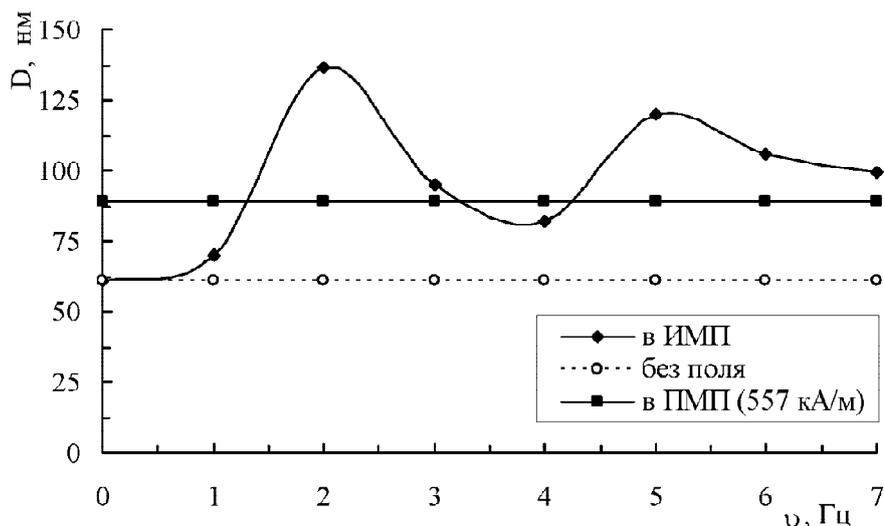


Рис. 3. Частотная зависимость среднего размера блоков когерентного рассеяния сплава при температуре старения 350 °С и времени старения 1 ч

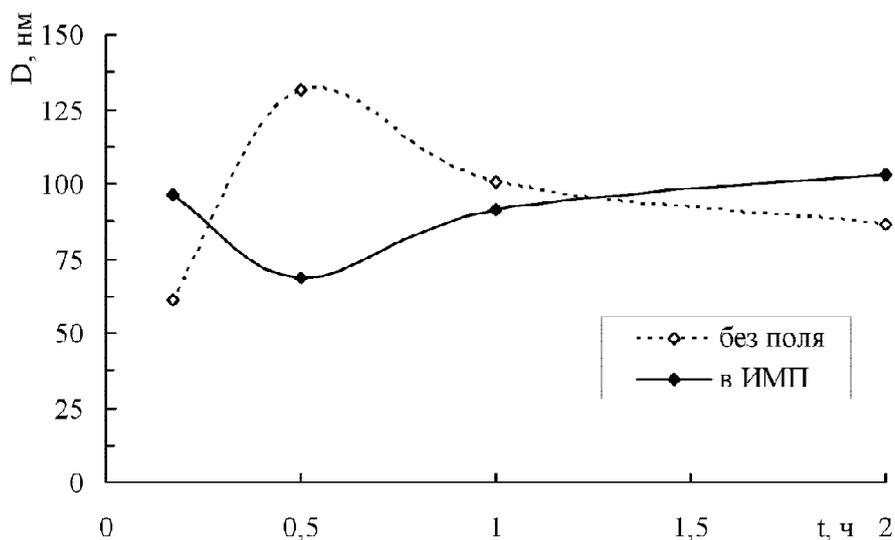


Рис. 4. Временная зависимость среднего размера блоков когерентного рассеяния сплава при температуре старения 350 °С и частоте ИМП 2 Гц

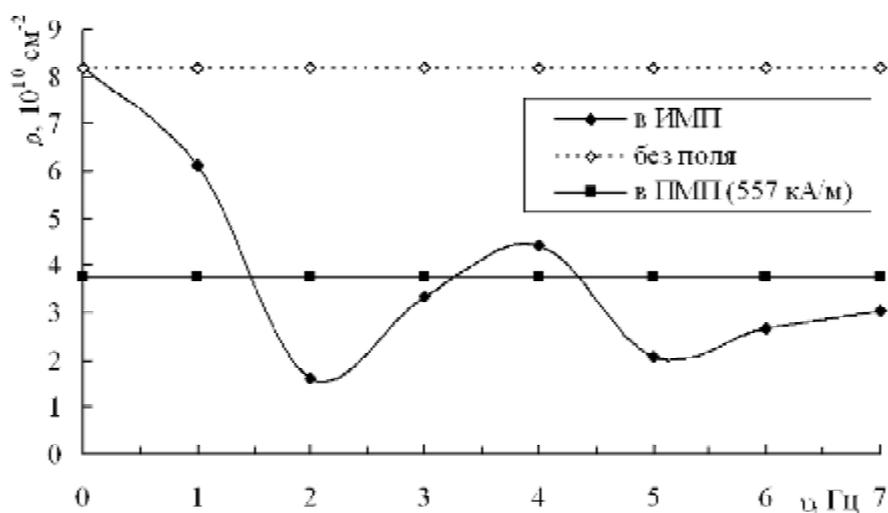


Рис. 5. Частотная зависимость плотности дислокаций сплава при температуре старения 350 °С и времени старения 1 ч

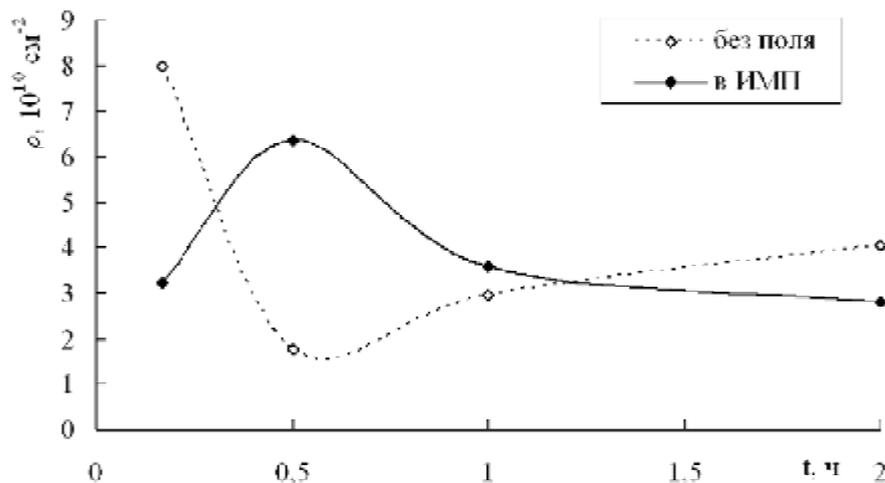


Рис. 6. Временная плотности дислокаций сплава при температуре старения 350 °С и частоте ИМП 2 Гц

лению скорости движения дислокаций при пластическом деформировании материала и соответствующему повышению микротвердости. Именно при отжиге в ИМП частотой 1 и 3,5 Гц наблюдается максимальное значение микротвердости сплава и максимальное значение плотности дислокаций (соответственно, минимальные значения размера когерентно-рассеивающих блоков). Однако в отличие от результатов, полученных для ПМП, ИМП не вносит такого вклада в значения параметров тонкой структуры, который привел бы к увеличению твердости сплава по сравнению с образцами, отожженными без поля. Кроме того, как и в случае наложения ПМП, ИМП почти на всем временном интервале не изменяет стадийности процесса старения при всех исследованных температурах 300, 350 и 400 °С.

По полученным рентгеновским данным также были построены частотные и временные за-

висимости параметра решетки и концентрации бериллия в остаточной матрице для образцов, состаренных в ИМП и в его отсутствие (см. рис. 7-10) для температуры 350 °С. Средняя ошибка полученных результатов составила ~ 0,06% и ~ 1,15%, соответственно.

Данные показывают, что α-линия (111) закаленного образца, представляющего собой твердый раствор на основе меди с равномерно распределенными атомами бериллия, смещена на 0,04° на “передних” линиях и на 1,13° на “задних” линиях в сторону больших углов по сравнению с соответствующими линиям чистой меди. Это связано с тем, что в решетке сплава бериллиевой бронзы БрБ-2 большие атомы меди замещены меньшими по размеру атомами бериллия, т.е. параметр решетки сплава меньше, чем параметр решетки чистой меди. Данные по брэгговским (111)_α-отражениям бериллиевой бронзы БрБ-2

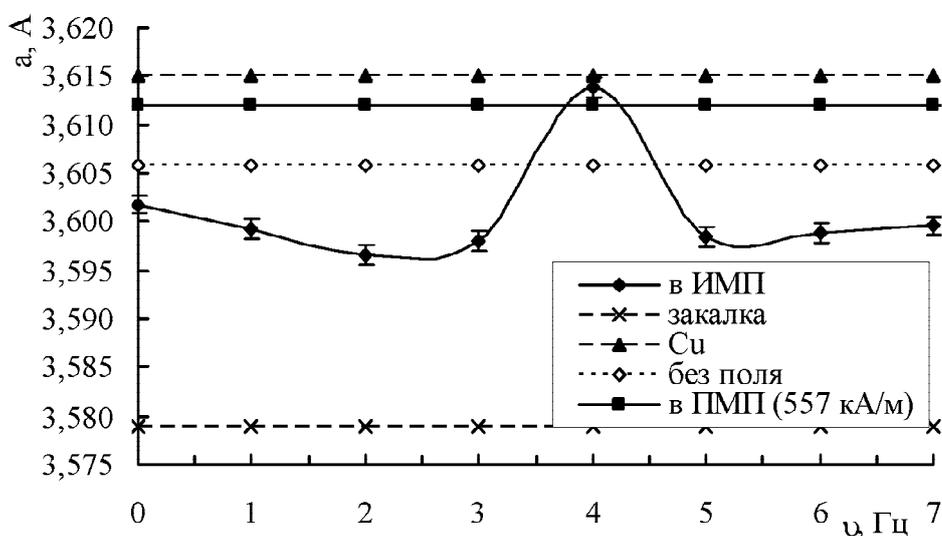


Рис. 7. Зависимость параметра решетки матрицы от частоты ИМП при температуре старения 350 °С и времени старения 1 ч

показывают, что термическая и термомагнитная обработка, кроме старения при 2 Гц, также приводит к заметному смещению их положения в сторону меньших значений углов при всех режимах старения относительно закаленного образца. Однако, из рис. 7 видно, что истощение матрицы сплава атомами бериллия и переход их в зоны обогащения происходит интенсивнее без наложения ИМП, чем в его присутствии.

В закаленном состоянии атомы бериллия равномерно распределены в матрице меди, при этом параметр решетки составляет $3,578 \pm 0,002$ Å. В процессе старения бериллий уходит из матрицы в зоны обогащения и параметр решетки оставшегося материнского твердого раствора увеличивается, что наглядно просматривается на рис. 7 и 8. Причем, из тех же рисунков видно, что увеличение параметра решетки матрицы всегда больше в ПМП или в отсутствие такового. Характер зависимости параметра решетки от частоты ИМП свидетельствует о том, что переход атомов бериллия из раствора в обогащенные зоны фазовых выделений происходит по сравнению с данными без поля и в ПМП не так активно, что и приводит к меньшему увеличению параметра решетки остаточного материнского твердого раствора [7]. Полученные экспериментальные результаты для температуры 350 °С позволяют сделать вывод, что наиболее значительные изменения параметра решетки происходят при старении с частотой ИМП 4 Гц, т.е. при этой частоте наиболее активно протекает процесс формирования зон обогащения (рис. 7).

Кроме этого, временная зависимость параметра решетки (рис. 8) показывает, что наложе-

ние ИМП не меняет ход изменения параметра, как и в случае микротвердости (рис. 2).

По данным рентгенофазового анализа рассчитаны значения концентрации бериллия в остаточной матрице в зависимости от частоты ИМП (рис. 9 и 10). Все расчеты выполнялись по “задним” рентгеновским линиям, так как точность расчетов по ним выше, чем по “передним”.

Заметим, что именно при частоте 4 Гц наблюдается минимальное значение концентрации бериллия в матрице (рис. 9) и, как следствие, максимальное его количество в зонах обогащения, за счет которых и произошло упрочнение, именно при этом режиме значение микротвердости достигает максимума (рис. 1). Полученные зависимости (рис. 9-10) объясняют результаты, полученные методом микротвердости (рис. 1-2), так как уменьшение бериллия в остаточной матрице приводит к увеличению микротвердости сплава, что подтверждается литературными данными [8] и полученными ранее результатами для образцов, состаренных в ПМП [7].

Кроме этого, анализ полученных данных показал корреляцию концентрации бериллия в остаточной матрице и параметра решетки сплава со значениями микротвердости, т.е. экстремумы значений концентрации бериллия в остаточной матрице соответствуют экстремумам микротвердости, что согласуется с положениями физики прочности и пластичности. Результаты по концентрации бериллия в остаточной матрице и параметрам решетки, полученные для температур 300 и 400 °С, подобны рассмотренным для температуры 350 °С.

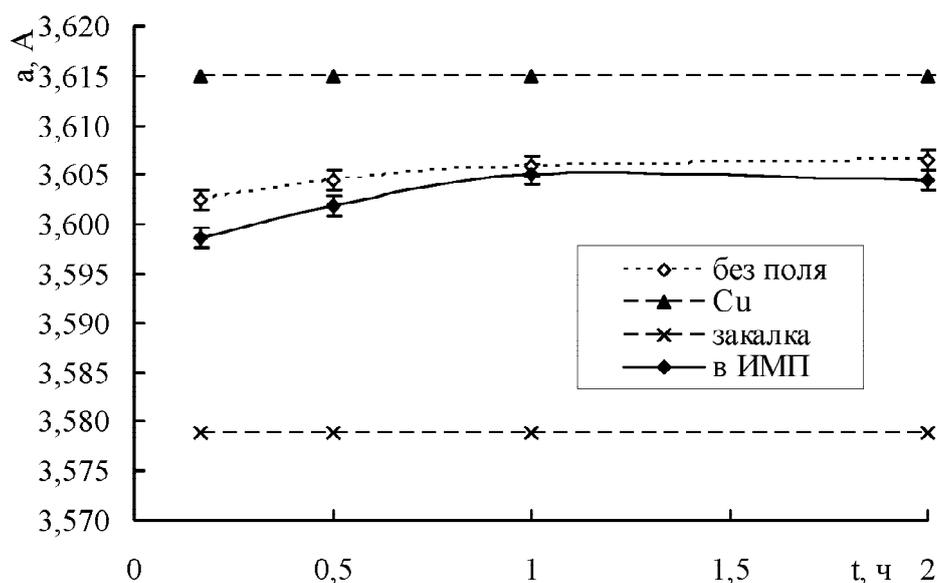


Рис. 8. Зависимость параметра решетки матрицы от времени при температуре старения 350 °С и частоте ИМП 2 Гц

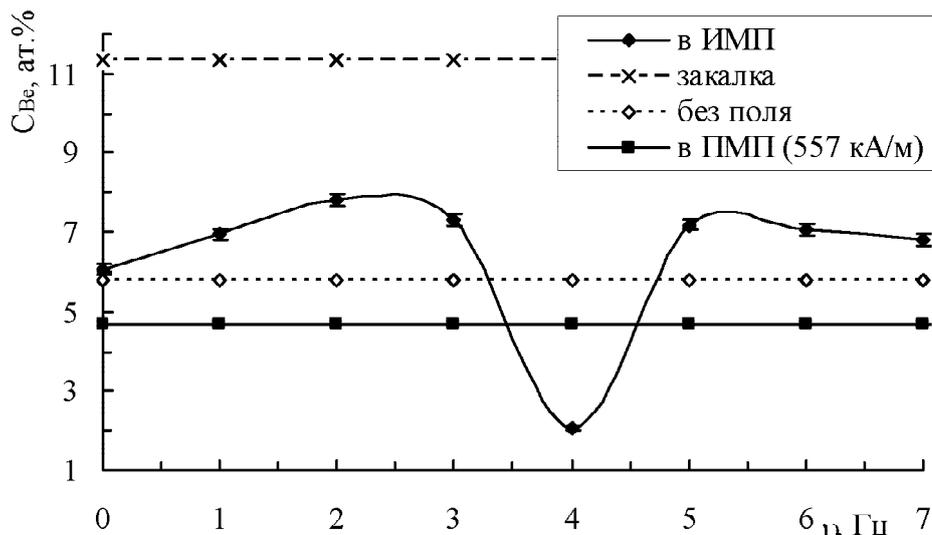


Рис. 9. Зависимость средней концентрации бериллия в остаточной материнской матрице от частоты ИМП при температуре старения 350 °С и времени старения 1 ч

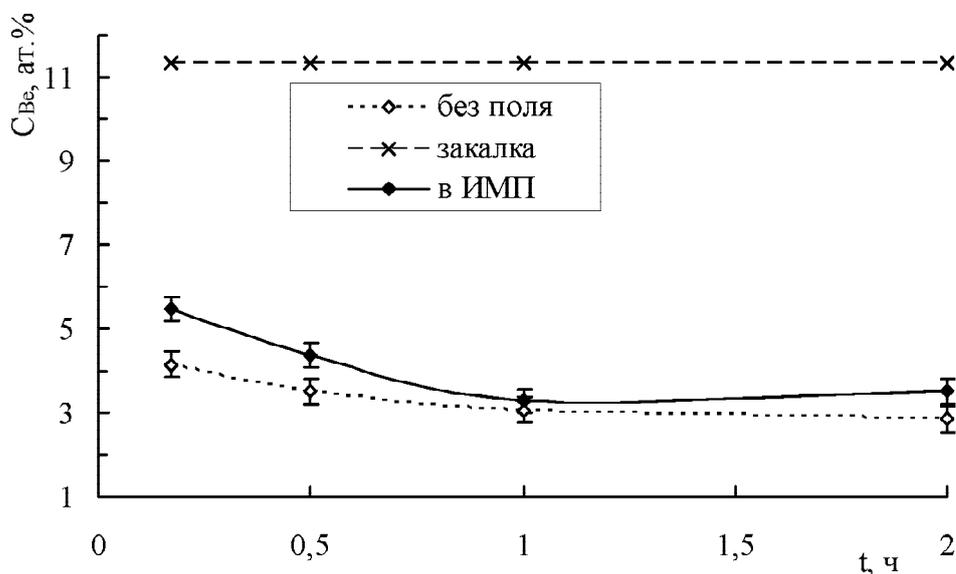


Рис. 10. Зависимость средней концентрации бериллия в остаточной материнской матрице от времени при температуре старения 350 °С и частоте ИМП 2 Гц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ и сопоставление экспериментальных и литературных данных о старении бериллиевой бронзы БрБ-2 позволяет сделать следующие выводы:

1. Впервые выполнено экспериментальное комплексное исследование влияния частоты ИМП, времени и температуры отжига на МПЭ, возникающий при старении бериллиевой бронзы БрБ-2

2. Эффект влияния ИМП на старение бериллиевой бронзы существует и устойчиво обнаруживается методом микротвердости и рентгеновскими методами в исследованных интервалах температур, частот ИМП и длительности старения.

3. Данные рентгеноструктурного анализа, свидетельствует о том, что кривые частотных и временных зависимостей параметров тонкой

структуры, параметра решетки и концентрации бериллия в остаточной матрице коррелируют с соответствующими зависимостями микротвердости, что соответствует основным закономерностям процесса старения.

4. Результаты работы показывают, что ИМП оказывает “отрицательное” воздействие на прочностные свойства сплава бериллиевой бронзы, хотя при этом пластические свойства сплава улучшаются, т.е. наблюдается положительный МПЭ. Объяснение поведения сплава в таких условиях старения требует дальнейших экспериментальных исследований и теоретического анализа.

5. Конечно, приведенные данные по старению бериллиевой бронзы БрБ-2 в ИМП не достаточны для их полной физической интерпретации. Однако есть основания предполагать, что они дают полезную информацию для развития

теоретических представлений и механизмов о взаимодействии структурных и магнитных дефектов в концепции спин-зависимых реакций дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Влияние постоянного магнитного поля на скорость пластического течения монокристаллов NaCl:Ca // ФТТ. 1995. Т. 37. Вып. 7.
2. Смирнов Б.И., Шпейсман В.В., Песчанская Н.Н., Николаев Р.К. Влияние магнитного поля на скорость микропластической деформации монокристаллов C_{60} // ФТТ. 2002. Т. 44. Вып. 10.
3. Урусовская А.А., Альшиц В.И., Смирнов А.Е., Беккаурэр Н.Н. О влияние магнитного поля на предел текучести и кинетику макропластичности кристаллов LiF // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 65. Вып. 6.
4. Гершензон Н.Н., Залтимиани Д.О., Манджгаладзе П.В., Похотелов О.А. Влияние магнитного поля на процессы разрушения монокристаллов LiF // ФТТ. 1986. Т. 28. Вып. 3.
5. Тяпунина Н.А., Красников В.Л., Белозерова Э.П. Влияние магнитного поля на неупругие свойства KBr // Кристаллография. 2000. Т. 45. Вып. 1.
6. Осипьян Ю.А., Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Николаев Р.К., Пушинин И.П., Шмурак С.З. Инверсия знака магнитопластического эффекта в монокристаллах C_{60} при фазовом переходе sc-fcc // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 7.
7. Осинская Ю.В., Покоев А.В. Упрочнение бериллиевой бронзы BrB-2 при старении в постоянном магнитном поле // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 3.
8. Тофпенец Р.Л. Разупрочняющие процессы в стареющих сплавах. Минск: Наука и техника, 1979.
9. Пастухова Ж.П., Рахштадт А.Г. Пружинные сплавы меди. М.: Металлургия, 1979.
10. Runov V.V., Pokoev A.V., Runova M.K., Smirnov O.P. The influence of magnetic field on phase nucleation in Cu-Be alloy // J. Phys.: Condens. Matter. 2008. V.20.
11. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петрижик Е.А. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы // Кристаллография. 2003. Т. 48. №5.
12. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 5.
13. Моргунов Р.Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности // УФН. 2004. Т. 174. №2.
14. Дацко О.И., Алексеенко В.И. Внутренне трение в магнитообработанном материале с дислокациями // ФТТ. 1997. Т. 39. Вып. 7.
15. Здор Г.Н., Анисович А.Г., Яскович А.Г. Применение импульсного магнитного поля для повышения механических свойств сплавов цветных металлов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 5.
16. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-микроскопический анализ. М.: МИСИС, 2002.

INFLUENCE OF PULSE MAGNETIC FIELD FREQUENCY, TEMPERATURES AND AGEING TIME ON MAGNETO-PLASTIC EFFECT IN BERYLLIUM BRONZE BrB 2

© 2009 J.V. Osinskaya, S.S. Petrov, A.V. Pokoev

Samara State University

The experiments show, that imposition of comparatively small magnetic fields can lead to the change of crystal plastic properties. This phenomenon was named magneto-plastic effect. Kinetics of temperature, frequency and time dependences of physical-mechanic properties of beryllium bronze alloy BrB-2 in the process of diffusion-controlled ageing in pulse magnetic field with frequency from 0 to 7 Hz and impulse strength amplitude 557.2 kA/m, under 300, 350, 400 °C and annealing duration from 0 to 2 hours was investigated by method of microhardness and X-ray. The result of given work show, pulse magnetic field exerts a noticeable influence on plastic properties of beryllium bronze and the positive magneto-plastic effect is observed. Explanation of behavior of the alloy in such aging conditions demands further experimental investigation and theoretical analysis. The obtained data give useful information for development of the theoretical ideas of interaction of structural and magnetic defects in the conception of spin-dependent reaction of defects.

Key words: ageing, magneto-plastic effect, beryllium bronze, pulse magnetic field, plasticity

Julia Osinskaya, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Solid State Physics and Nonequilibrium Systems Chair. E-mail: ojb@ssu.samara.ru.
Sergey Petrov, Graduate Student. E-mail: serpet1@yandex.ru.
Alexander Pokoev, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Head at the Solid State Physics and Nonequilibrium Systems Chair. E-mail: pokoev@ssu.samara.ru.