

ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ ВИСМУТА НА КИНЕТИКУ СТАРЕНИЯ БРОНЗЫ ПРИ ПОВТОРНОМ ОТЖИГЕ

С.И. Жукова, Н.И. Поляк

Белгосуниверситет, пр. Независимости, 4, 220050, Минск, тел. 209-55 90,

e-mail: Zhukova@bsu.by

Исследовано изменение микротвердости H и физического уширения дифракционной линии β_{222} в процессе пострadiaционного отжига дисперсионно твердеющего сплава БрБ2, имплантированного на фазовой стадии старения ионами Вi с энергией 710 МэВ до доз $6,5 \cdot 10^{12}$ и $1,65 \cdot 10^{13}$ см⁻². Анализ кинетики повторного старения показал, что эффекты имплантации малых доз высокоэнергетических ионов обусловлены радиационно-индуцированными процессами достаривания сплава.

Введение

В работах [1-3] установлено, что изменение микротвердости и параметров тонкой структуры дисперсионно твердеющего сплава БрБ2 (бериллиевой бронзы), имплантированного на стадии фазового старения ионами Кг с энергией 245 МэВ в диапазоне доз $10^{13} \dots 10^{14}$ см⁻², обусловлено радиационно-стимулированными процессами достаривания сплава вплоть до развития стадии коагуляционного старения. Это заключение подтверждено результатами электронно-микроскопических исследований структуры и фазового состава имплантированного сплава. Следует особо подчеркнуть, что наблюдаемые эффекты изменения структурно-фазового состояния и свойств в анализируемом приповерхностном слое сплава происходят при весьма малых повреждающих дозах $8 \cdot 10^{-4} \dots 8 \cdot 10^{-3}$ с.н.а.

В настоящей работе исследован эффект имплантации в этот же сплав высокоэнергетических ионов Вi.

Основная часть

Образцы сплава БрБ2 с содержанием 2 вес.% Ве после закалки в воду от $T_{\text{зак}} = 1053$ К отжигались в течение 1 часа при $T_1 = 623$ К. Как показали исследования с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии [2, 3], такой режим старения соответствует началу превращения тонких пластинчатых выделений γ'' -фазы в γ' -фазу. Кроме того, эффект диффузного рассеяния в виде тонких тяжей вдоль $\langle 100 \rangle$ -направлений на картинах микродифракции свидетельствует о наличии зон Гинье-Престона (зГП) в матричном твердом растворе α . Таким образом, фазовый состав сплава в исходном состоянии представляет смесь фаз $\alpha + \text{зГП} + \gamma'$, что соответствует восходящей ветви старения.

Имплантация ионов Вi с энергией 710 МэВ осуществлялась до доз $6,5 \cdot 10^{12}$ и $1,65 \cdot 10^{13}$ см⁻² ($1,6 \cdot 10^{-3}$ и $4,3 \cdot 10^{-3}$ с.н.а. соответственно). Исследовано изменение микротвердости H и физического уширения дифракционной линии β_{222} α -твердого раствора имплантированного сплава, а также в процессе пострadiaционного отжига при $T_2 = 673$ К. Описание использованных методик приведено в [4].

Обсуждение результатов исследования имеет смысл проводить в сравнении с результатами

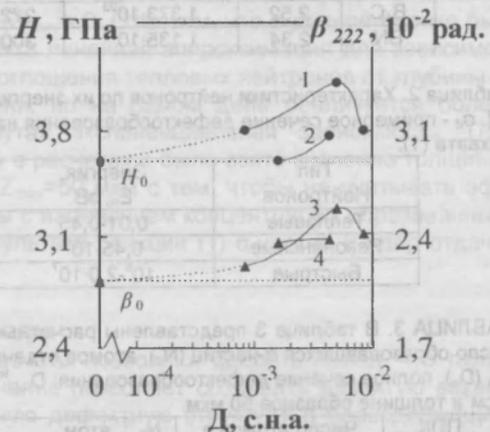
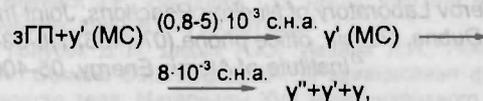


Рис.1. Дозовые зависимости микротвердости H (1, 2), физического уширения β_{222} (3, 4) бериллиевой бронзы, имплантированной ионами Вi (2, 4) и Кг (1, 3).

[2,3], полученными при имплантации ионов Кг в исследуемый сплав. На рис. 1 приведены дозовые зависимости H и β_{222} .

В работах [2, 3] с помощью прямых методов исследования (ПЭМ) установлена последовательность фазовых превращений, происходящих при имплантации ионов криптона с ростом повреждающей дозы:



где МС – модулированная структура.

Наблюдаемое периодическое расположение упрочняющих выделений в исходном сплаве (модулированная структура) с ростом дозы до $5 \cdot 10^3$ с.н.а. становится четче за счет увеличения размеров и количества когерентных пластинчатых выделений γ' -фазы в результате растворения зГП. Эти превращения приводят к росту значений H и β_{222} в связи с увеличением уровня микронапряжений в кристаллической решетке матрицы сплава. При дозе $8 \cdot 10^3$ с.н.а. происходит выделение равновесной некогерентной γ -фазы. Потеря когерентности приводит к ослаблению микронапряжений, частичному разрушению МС и снижению значений H и β_{222} . Характер дозовой зависимости H и β при имплантации малых доз ионов Кг в бериллиевую бронзу на фазовой стадии старения аналогичен их изменению при старении в

термических условиях, несмотря на различие в механизмах фазовых превращений.

Интервал повреждающих доз при имплантации в сплав ионов $Вi$ находится в области, соответствующей достижению сплава за счет радиационно-стимулированного роста выделений γ' -фазы в случае имплантации ионов Kg , однако эффект изменения H и β меньше и дозовая зависимость не так значительна.

Использование методики двухступенчатого старения, включающей старение при T_1 и повторное старение при $T_2 > T_1$, позволяет по изменению кинетики старения судить о структурно-фазовом состоянии сплава, созданного предварительной обработкой к моменту начала повторного старения. Так, если T_2 превышает границу растворимости когерентных метастабильных выделений, то при повторном старении наблюдается возврат свойств, связанный с растворением этих выделений или превращением промежуточных фаз в равновесные [5]. Кроме этого, необходимо учитывать распределение выделений по их размерам, поскольку размер критического зародыша возрастает с повышением температуры старения в связи с уменьшением пересыщенности α -раствора. В этом случае возврат свойств при повторном старении обусловлен растворением выделений с размером меньше критического.

На рис. 2 приведены кривые повторного старения исследуемого сплава до и после имплантации ионов $Вi$. Для сравнения приведены кривые старения этого сплава непосредственно после закалки.

Изменение H и β_{222} в процессе старения закаленного сплава (кривые 1, рис. 2а, б) имеют вид кривых с максимумом, восходящая ветвь которых обусловлена процессами распада пересыщенного твердого раствора по схеме $\alpha \rightarrow \alpha + 3ГП \rightarrow \alpha + \gamma'' \rightarrow \alpha + \gamma'$.

Наибольшее объемное несоответствие с кристаллической решеткой матрицы сплава имеет γ' -фаза, поэтому максимальные значения H и β на кривой старения соответствуют наличию периодически расположенных γ' -выделений в сплаве.

Ниспадающая ветвь кривых старения обусловлена превращением γ' в равновесную γ -фазу и разрушением модулированной структуры сплава.

При повторном старении неимплантированного сплава в первые минуты отжига наблюдается частичный возврат β_{222} и относительное постоянство H . Затем β_{222} возрастает и после 10 минут отжига значения H и β_{222} монотонно уменьшаются. При больших временах отжига кривые старения неимплантированного сплава и закаленного сближаются.

Частичный возврат β_{222} вызван снижением микронапряжений в матрице сплава за счет растворения мелких включений γ' -фазы и 3ГП, поскольку T_2 превышает T_1 на 50К. Уменьшение значения постоянной решетки a (кривая 2 на рис. 2в) является подтверждением этого заключения. Одновременно с процессами растворения включений происходит рост зародышей γ' -фазы с размерами больше критического, что приводит к возрастанию значений β_{222} и a в интервале от 5 до 10 мин отжига.

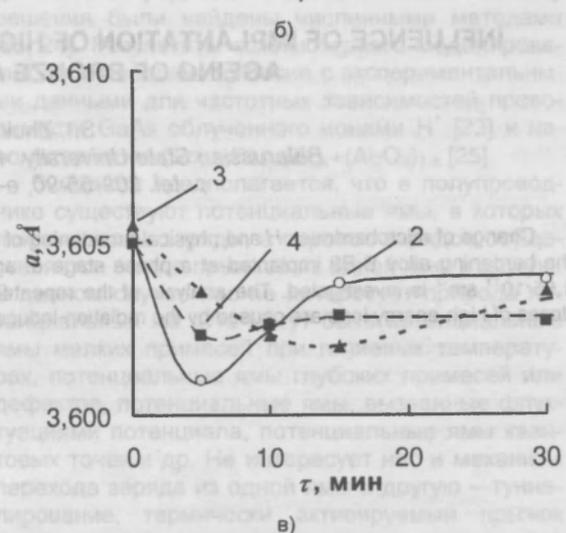
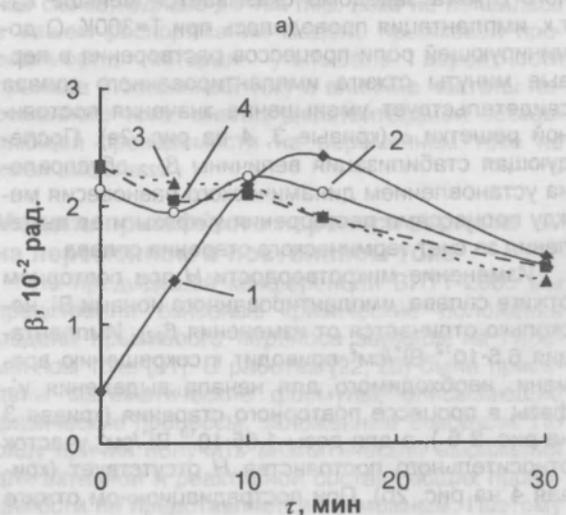
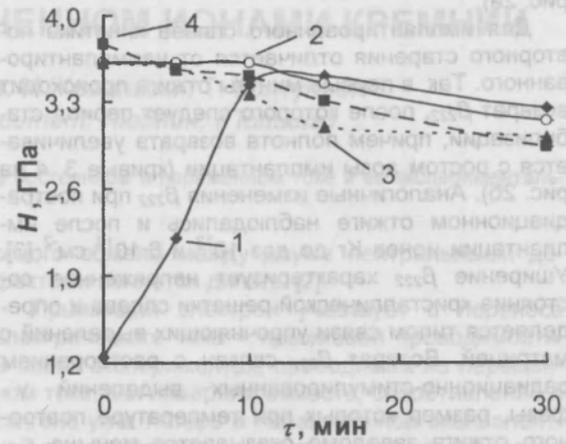


Рис. 2. Изменение микротвердости H (а), физического уширения β_{222} (б) и параметра решетки a (в) сплава БрБ2 при повторном старении: 1 - закаленный, 2 - исходный, 3 - имплантация $6,5 \cdot 10^{12}$ $Вi/cm^2$, 4 - имплантация $1,65 \cdot 10^{13}$ $Вi/cm^2$.

Микротвердость определяется не только типом связи выделений с матрицей сплава, но и взаимодействием дислокаций с ними, поэтому в начальный период отжига наблюдается относи-

тельное постоянство величины H (кривая 2 на рис. 2а).

Для имплантированного сплава кинетика повторного старения отличается от неимплантированного. Так, в первые минуты отжига происходит возврат β_{222} , после которого следует период стабилизации, причем полнота возврата увеличивается с ростом дозы имплантации (кривые 3, 4 на рис. 2б). Аналогичные изменения β_{222} при пострадационном отжиге наблюдались и после имплантации ионов Кг до доз 10^{13} и $6 \cdot 10^{12}$ см² [3]. Уширение β_{222} характеризует напряженное состояние кристаллической решетки сплава и определяется типом связи упрочняющих выделений с матрицей. Возврат β_{222} связан с растворением радиационно-стимулированных выделений γ' -фазы, размер которых при температуре повторного отжига заведомо оказывается меньше $r_{кр}$, т.к. имплантация проводилась при $T=300\text{K}$. О доминирующей роли процессов растворения в первые минуты отжига имплантированного сплава свидетельствует уменьшение значения постоянной решетки a (кривые 3, 4 на рис. 2в). Последующая стабилизация величины β_{222} обусловлена установлением динамического равновесия между процессами растворения γ' -фазы и ее выделения за счет термического старения сплава.

Изменение микротвердости H при повторном отжиге сплава, имплантированного ионами Вi, несколько отличается от изменения β_{222} . Имплантация $6,5 \cdot 10^{12}$ Вi⁺/см² приводит к сокращению времени, необходимого для начала выделения γ' -фазы в процессе повторного старения (кривая 3 на рис. 2 б), а для дозы $1,65 \cdot 10^{13}$ Вi⁺/см² участок относительного постоянства H отсутствует (кривая 4 на рис. 2б). При пострадационном отжиге

бронзы, имплантированной ионами Кг (в соответствующем интервале доз), характер изменения H был аналогичным [3].

Таким образом, сравнительный анализ дозовых зависимостей H , β_{222} и кинетики повторного отжига при двухступенчатом старении позволяет сделать заключение о том, что при имплантации высокоэнергетических ионов Вi до доз $6,5 \cdot 10^{12}$ и $1,65 \cdot 10^{13}$ см² в бериллиевую бронзу на стадии фазового старения, как и в случае имплантации ионов криптона в соответствующем интервале доз, происходят радиационно-индуцированные процессы достаривания сплава с выделением γ' -фазы.

Заключение

Имплантация ионов Вi с энергией 710 МэВ до доз $6,5 \cdot 10^{12}$ и $1,65 \cdot 10^{13}$ см² приводит к упрочнению бериллиевой бронзы, что обусловлено радиационно-индуцированными процессами выделения упрочняющей γ' -фазы.

Список литературы

1. Анищик В.М., Жукова С.И., Поляк Н.И., Скуратов В.А // ФизХОМ.-2003.-№ 5.-С. 11.
2. Анищик В.М., Жукова С.И., Поляк Н.И., Васильева Л.А. // Доклады НАН Беларуси.-2005.-Т.49.-№4.-С.60.
3. Жукова С.И., Поляк Н.И., Васильева Л.А., Дидык А.Ю., Скуратов В.А. // ФизХОМ.-2006.-№ 1.-С. 26.
4. Жукова С.И., Поляк Н.И., Васильева Л.А., Анищик В.М., Скуратов В.А., Дидык А.Ю. // ФизХОМ.-2004.-№ 6.-С. 20.
5. Чуистов К.В. Старение металлических сплавов. Киев: Наукова думка, 1985. 230 с.

INFLUENCE OF IMPLANTATION OF HIGH-ENERGY IONS OF BISMUTH ON KINETICS AGEING OF BRONZE AT REPEATED ANNEALING

S.I. Zhukova, N.I. Poliak

Belarussian State University, 4, Nezavisimost Ave., 220050, Minsk,
tel. 209-55-90, e-mail: Zhukova@bsu.by

Change of microhardness H and physical broadening of diffraction lines β_{222} during postradiating annealing of the dispersion the hardening alloy BrB2 implanted at a phase stage of ageing by ions Bi by energy 710 МэВ up to dozes of $6,5 \cdot 10^{12}$ and $1,65 \cdot 10^{13}$ см² is investigated. The analysis of the repeated ageing kinetics has shown, that effects of implantation of small dozes of high-energy ions are caused by the radiation-induced processes of the alloy ageing.