

УДК 669.45 + 548.735

СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВА Zn – 2 мас. % Bi

В. Г. ШЕПЕЛЕВИЧ¹⁾, А. С. КЛЯУЗО^{1), 2)}, М. В. ГОЛЬЦЕВ²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный медицинский университет,
пр. Дзержинского, 83, 220083, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования структуры и микротвердости сплава Zn – 2 мас. % Bi, изготовленного при различных скоростях охлаждения расплава. Установлено, что кристаллизация сплава со средней скоростью охлаждения 10 К/с вызывает появление ячеек в массивных образцах, а со скоростью охлаждения 10^5 – 10^6 К/с – образование дисперсных выделений висмута в быстрозатвердевших фольгах. Средний диаметр частиц висмута, расположенных в объеме ячеек и на их границах, равен 0,1 и 0,3 мкм соответственно. Средний размер зерен массивных образцов на порядок превосходит средний размер зерен быстрозатвердевших фольг. В массивных образцах формируется слабовыраженная текстура цинка (1013 + 2021), в быстрозатвердевших фольгах формируются текстуры цинка (0001) + (1010) и (1011) + (1122) (в слое, прилегающем к поверхности кристаллизатора,

Образец цитирования:

Шепелевич ВГ, Кляузо АС, Гольцев МВ. Структура и микротвердость сплава Zn – 2 мас. % Bi. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2026;1:35–43.
EDN: HYFFNO

For citation:

Shepelevich VG, Kliauzo AS, Goltsev MV. Structure and microhardness of Zn – 2 wt. % Bi alloy. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2026;1:35–43. Russian.
EDN: HYFFNO

Авторы:

Василий Григорьевич Шепелевич – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.
Алексей Сергеевич Кляузо – аспирант кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета¹⁾, старший преподаватель кафедры медицинской и биологической физики фармацевтического факультета²⁾. Научный руководитель – В. Г. Шепелевич.

Михаил Всеволодович Гольцев – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий кафедрой медицинской и биологической физики фармацевтического факультета.

Authors:

Vasiliy G. Shepelevich, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.
shepelevich.vg@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5899-1690>

Aliaksei S. Kliauzo, postgraduate student at the department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics^a, and senior lecturer at the department of medical and biological physics, faculty of pharmacy^b.

kliauzo811@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-3701-6532>

Mikhail V. Goltsev, PhD (physics and mathematics), docent; head of the department of medical and biological physics, faculty of pharmacy.

mgoltsev@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0006-8904-6882>

и слое свободной поверхности соответственно). При изохронном отжиге быстрозатвердевших фольг сплава Zn – 2 мас. % Bi происходит уменьшение микротвердости в интервале температур 50–120 °C вследствие распада пересыщенного твердого раствора висмута в цинке и коалесценции дисперсных выделений висмута в интервале температур 50–120 °C. Изменение микротвердости в интервале температур 240–280 °C обусловлено протеканием эвтектического превращения.

Ключевые слова: сплав цинк – висмут; ячеистая структура; текстура; дисперсные частицы висмута; микротвердость.

STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF Zn – 2 wt. % Bi ALLOY

V. G. SHEPELEVICH^a, A. S. KLIAUZO^{a, b}, M. V. GOLTSEV^b

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bBelarusian State Medical University, 83 Dziarzhynskaga Avenue, Minsk 220083, Belarus

Corresponding author: A. S. Kliauzo (kliauzo811@gmail.com)

Abstract. The results of a study of the structure and microhardness of a Zn – 2 wt. % Bi alloy fabricated at different melt cooling rates are presented. It was found that alloy crystallisation at an average cooling rate of 10 K/s causes the formation of cells in bulk samples, while at a cooling rate of 10^5 – 10^6 K/s it leads to the formation of dispersed bismuth precipitates in rapidly solidified foils. The average diameter of bismuth particles located within the cell volume and at their boundaries are 0.1 and 0.3 μm , respectively. The average grain size of the bulk samples is an order of magnitude larger than that of the rapidly solidified foils. In massive samples a weakly expressed zinc texture (1013) + (2021) is formed, while in rapidly solidified foils zinc textures (0001) + (1010) and (1011) + (1122) are formed (in the layer adjacent to the crystalliser surface and in the free surface layer, respectively). During isochronous annealing of rapidly solidified Zn – 2 wt. % Bi foils, a decrease in microhardness occurs in the temperature range of 50–120 °C due to the decomposition of the super-saturated solid solution of bismuth in zinc and the coalescence of dispersed bismuth precipitates in the temperature range of 50–120 °C. The change in microhardness in the temperature range of 240–280 °C is due to the eutectic transformation.

Keywords: zinc – bismuth alloy; cellular structure; texture; dispersed bismuth particles; microhardness.

Введение

Сплавы на базе цинка активно применяются в различных отраслях промышленности. Основными легирующими элементами являются алюминий и медь. Также для легирования используются магний и олово. Благодаря легированию указанными элементами удается создать сплавы на основе цинка с высокими механическими и технологическими характеристиками, используемые для изготовления различных изделий [1]. Влияние висмута на структуру и свойства цинка мало изучено, что связано с наличием на диаграмме состояния их сплава области несмешивания двух жидких фаз [2]. Существование области расслоения жидких фаз приводит к формированию нежелательной микроструктуры, оказывающей негативное воздействие на физические свойства сплавов. Однако в последнее десятилетие установлено, что сплавы, в которых при определенных интервалах температур и концентраций происходит расслоение на две отличающиеся химическим составом жидкости, могут обладать важными свойствами. Например, сплавы системы Al – Bi, в диаграмме состояния которых существует область несмешивания двух жидких фаз, используются для получения водорода при взаимодействии с водой¹ [3; 4]. В последние годы появились сообщения о целесообразности применения сплавов системы Zn – Bi для изготовления водных цинк-ионных электрических батарей [5]. Установлена возможность образования 20-атомного кластера (состоит из 9 атомов цинка и 11 атомов висмута), который обеспечивает переход от небольших кластеров к объемному металлу [6].

Цель настоящей работы – проведение исследования структуры и свойств монотектического сплава Zn – 2 мас. % Bi.

Материалы и методы исследования

Сплав Zn – 2 мас. % Bi получили сплавлением исходных компонентов и последующей кристаллизацией в графитовой изложнице. Литые образцы имели длину 7,0 см и поперечное сечение 0,5 см²; охлаждение происходило со средней скоростью около 10 К/с. Из средней части слитка вырезали образцы

¹Миркин А. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / под ред. Я. С. Уманского. М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. 864 с.

для исследования структуры и микротвердости. Для изготовления фольги кусочек сплава массой примерно 0,2 г расплавляли и каплю расплава инжестировали на внутреннюю полированную поверхность вращающегося медного цилиндра. Скорость охлаждения при изготовлении фольги составляла 10^5 – 10^6 К/с. Толщина фольг, использованных для определения структуры и исследования микротвердости, была равна 50–90 мкм.

Исследование элементного и фазового состава выполняли с помощью растрового электронного микроскопа LEO-1455VP (*Carl Zeiss*, Германия), имеющего специальную приставку HKL Channel 5. Рентгеноспектральный микроанализ фольг сплава осуществляли с использованием детектора фирмы *Rontec* (Германия). Металлографические исследования проводили методом случайных секущих с погрешностью 5–10 %. Рентгеноструктурные исследования выполняли на дифрактометре Ultimate IV (*Rigaku*, Япония) в медном излучении. Погрешность измерения параметра кристаллической решетки не превышала 10^{-4} нм. Изучение текстуры осуществляли методом обратных полюсных фигур [7] с использованием дифракционных отражений 0002, $10\bar{1}0$, $10\bar{1}1$, $10\bar{1}2$, $1\bar{1}20$, $10\bar{1}3$, $1\bar{1}22$, 2021. Микротвердость образцов измеряли на приборе ПМТ-3 (ОАО «ЛОМО», Россия) при нагрузке 20 г с погрешностью 4 %. Изохронный отжиг быстротвердевших фольг проводился с выдержкой 20 мин при каждой температуре в интервале 20–300 °С.

Результаты и их обсуждение

На дифрактограмме массивного сплава и его быстротвердевшей фольги Zn – 2 мас. % Bi наблюдаются дифракционные отражения цинка (0002, $10\bar{1}0$, $10\bar{1}1$, $10\bar{1}2$, $1\bar{1}20$, $10\bar{1}3$, $1\bar{1}22$, 2021) и висмута ($10\bar{1}2$, $10\bar{1}4$, $1\bar{1}20$, $10\bar{1}5$, 2020, 2022, 0224, $10\bar{1}7$, 2025, $1\bar{1}22$, $2\bar{1}30$, 0009) [7]. Были определены положения слабовыраженных дифракционных отражений при углах $2\theta = 31,7^\circ$, $2\theta = 33,9^\circ$ и $2\theta = 47,5^\circ$. Расчет показал, что указанным дифракционным отражениям соответствуют плоскости ($10\bar{1}0$), (2020) и ($0\bar{1}12$) окиси цинка [7].

С помощью металлографических шлифов изучена зеренная структура исследуемого сплава. Для массивного образца средний размер зерен равен 0,28 мм, для быстротвердевших фольг – 21,0 мкм.

Микроструктура участков поперечного сечения массивного образца, находящихся на различном расстоянии от его поверхности, изображена на рис. 1.

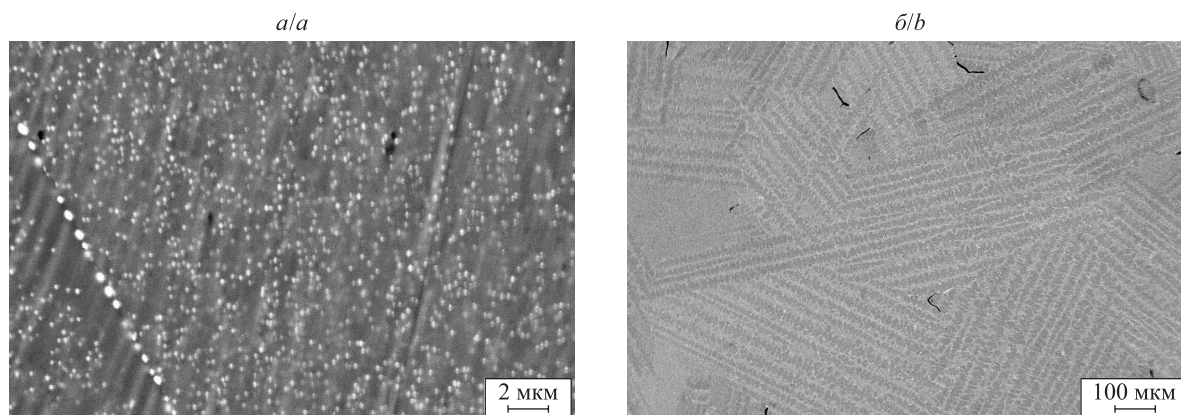


Рис. 1. Микроструктура участка 1 (а) и участка 2 (б) поперечного сечения массивного образца сплава Zn – 2 мас. % Bi, расположенных на различном расстоянии от его поверхности

Fig. 1. Microstructure of section 1 (a) and section 2 (b) of the cross section of a massive sample of Zn – 2 wt. % Bi alloy located at different distances from its surface

Участок 1 расположен ближе к поверхности слитка, чем участок 2. На участке 1 наблюдаются шарообразные белые выделения диаметром около 0,1 мкм. Рентгеноспектральный анализ показал, что ими являются выделения висмута. В темных областях концентрация висмута практически равна нулю, а в областях, содержащих светлые выделения, концентрация этого элемента составляет более 2 %. На границах образуются более крупные белые выделения (диаметр около 0,3 мкм). На участке 2 наблюдаются чередующиеся темные и светлые полосы, расположенные в пределах каждого зерна. Расстояние между светлыми полосами составляет 25–40 мкм, их толщина равна 5–20 мкм. Более детальная структура светлой полосы представлена на рис. 2. Белые полосы содержат большое количество дисперсных частиц

²Салтыков С. А. Стереометрическая металлография : учеб. пособие. М. : Металлургия, 1976. 272 с.

висмута, диаметр сечений которых достигает 0,3 мкм. Выделения висмута формируют ячейки между соседними светлыми полосами, средний размер которых составляет примерно 10–25 мкм.

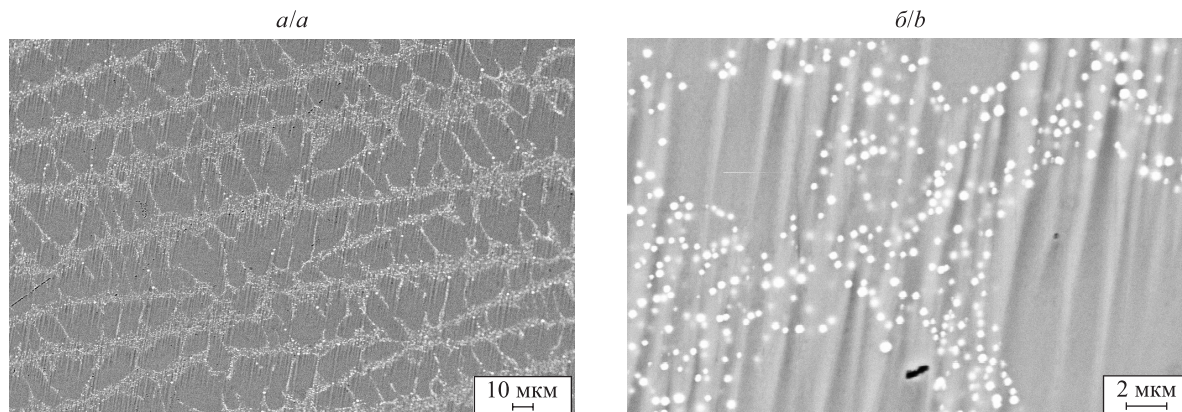


Рис. 2. Микроструктура светлых полос при масштабе 10 мкм (а) и масштабе 2 мкм (б)

Fig. 2. Microstructure of light bands a scale of 10 μm (a) and a scale of 2 μm (b)

Распределение компонентов вдоль линии перемещения электронного пучка по поверхности поперечного сечения массивного образца сплава Zn – 2 мас. % Bi (рис. 3) позволило определить, что белые участки соответствуют выделениям висмута, темные участки – выделениям цинка.

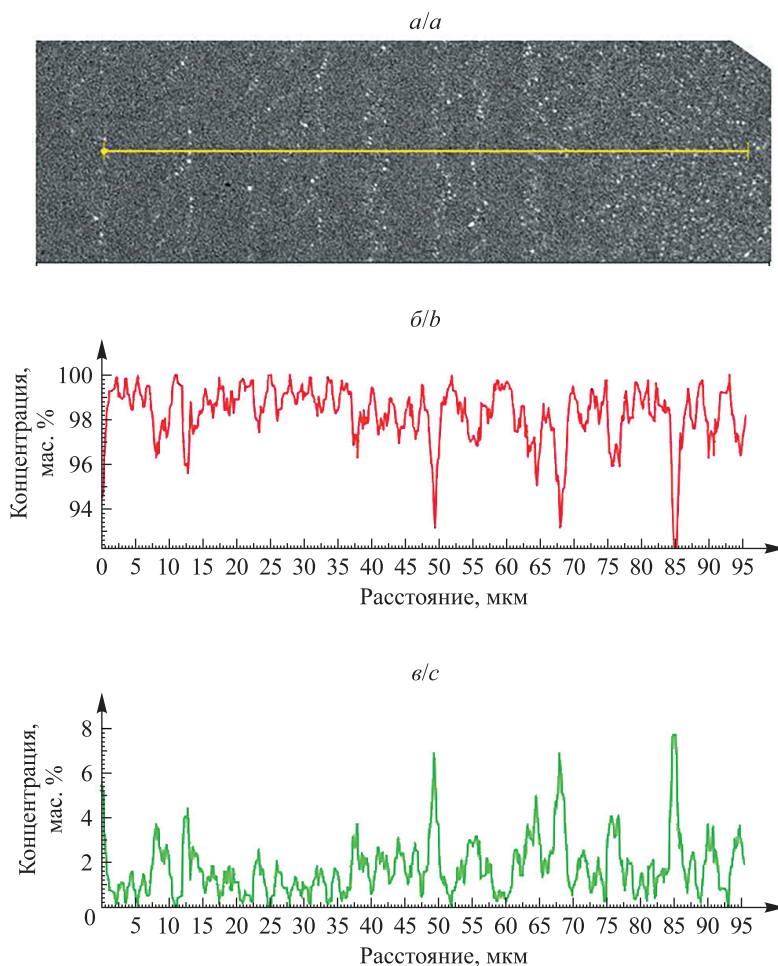


Рис. 3. Распределение цинка (б) и висмута (в) вдоль линии перемещения электронного пучка по поверхности поперечного сечения массивного образца сплава Zn – 2 мас. % Bi (а)

Fig. 3. Distributions of zinc (b) and bismuth (c) along the line of movement of the electron beam on the surface of the cross section of a massive sample of Zn – 2 wt. % Bi alloy (a)

Микроструктура поперечного сечения быстрозатвердевшей фольги сплава Zn – 2 мас. % Bi представлена на рис. 4. Серая область соответствует цинку, а белые участки соответствуют частицам висмута, которые находятся в объеме зерен и локализируются на их границах.

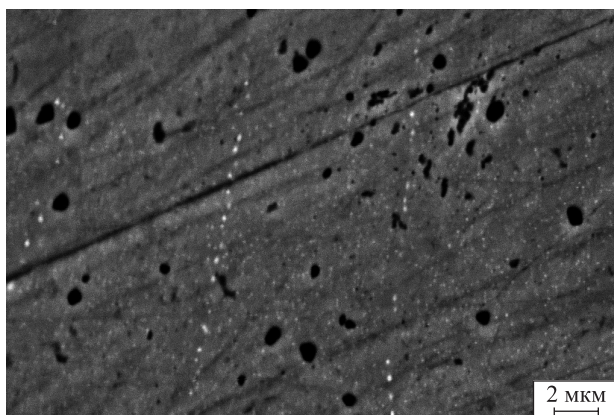


Рис. 4. Микроструктура поперечного сечения быстрозатвердевшей фольги сплава Zn – 2 мас. % Bi

Fig. 4. Microstructure of the cross section of rapidly solidified foil of Zn – 2 wt. % Bi alloy

Распределение хорд случайных секущих на сечениях частиц висмута, находящихся в объеме зерен и локализованных на их границах, по размерным группам для быстрозатвердевшей фольги изучаемого сплава приведено на рис. 5. Средний диаметр частиц висмута, содержащихся в объеме ячеек и на их границах, равен 0,1 и 0,2 мкм соответственно. Концентрация висмута в серой области равна 1,2 мас. %, а в области, содержащей его выделения, она достигает 3,8 мас. %.

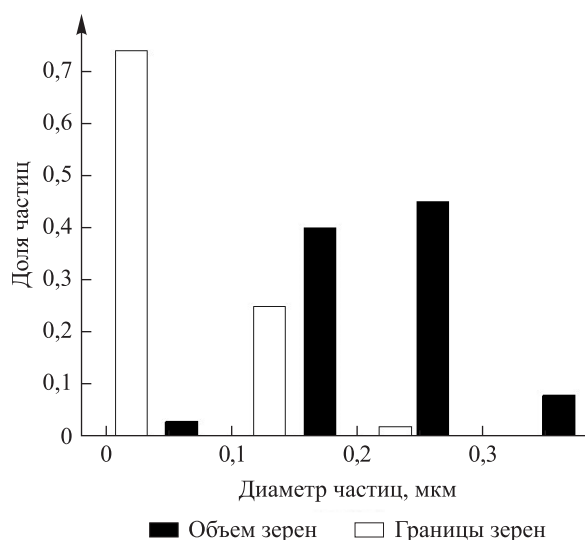


Рис. 5. Распределение хорд случайных секущих на сечениях частиц висмута, находящихся в объеме зерен и локализованных на их границах, по размерным группам для быстрозатвердевшей фольги сплава Zn – 2 мас. % Bi

Fig. 5. Distribution of chords of random secants on sections of bismuth particles located in the volume of grains and localised at their boundaries by size groups for rapidly solidified foil of Zn – 2 wt. % Bi alloy

В результате рентгеноспектрального микроанализа было обнаружено, что черные выделения содержат цинк и кислород. Рентгеноструктурный анализ позволил выявить слабовыраженные дифракционные отражения на дифрактограмме при углах $2\theta = 31,7^\circ$, $2\theta = 33,9^\circ$ и $2\theta = 47,5^\circ$. Расчет показал, что указанным дифракционным отражениям соответствуют плоскости $(10\bar{1}0)$, $(20\bar{2}0)$ и $(0\bar{1}12)$ окиси цинка [7]. На рис. 6 представлено распределение хорд случайных секущих на сечениях выделений окиси цинка по размерным группам для быстрозатвердевшей фольги изучаемого сплава.

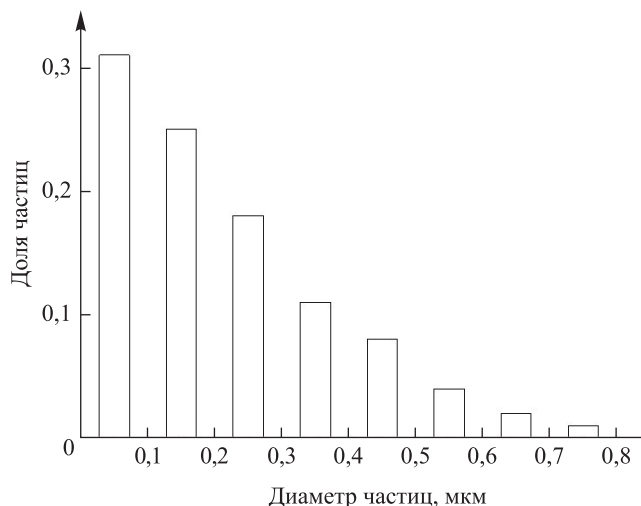


Рис. 6. Распределение хорд случайных секущих на сечениях выделений окиси цинка по размерным группам для быстрозатвердевшей фольги сплава Zn – 2 мас. % Bi

Fig. 6. Distribution of chords of random secants on sections of zinc oxide precipitates by size groups for rapidly solidified foil of Zn – 2 wt. % Bi alloy

Проведено исследование текстуры массивного образца и быстрозатвердевших фольг сплава Zn – 2 мас. % Bi. В табл. 1 представлены значения полюсных плотностей дифракционных отражений цинка в массивном образце, рассчитанные по методу Харриса. Значения полюсных плотностей дифракционных линий $10\bar{1}3$ и $20\bar{2}1$ несущественно отличаются от среднего значения для всех полюсных плотностей, что свидетельствует о формировании в массивном образце слабовыраженной текстуры $\{10\bar{1}3\} + \{20\bar{2}1\}$.

Таблица 1

Полюсные плотности
дифракционных отражений цинка
в массивном образце сплава Zn – 2 мас. % Bi

Table 1

Pole densities
of zinc diffraction reflections
in a massive sample of Zn – 2 wt. % Bi alloy

Дифракционное отражение	Полюсная плотность
0002	1,0
$10\bar{1}0$	0,9
$10\bar{1}1$	1,1
$10\bar{1}2$	0,8
$11\bar{2}0$	0,7
$10\bar{1}3$	1,4
$11\bar{2}2$	0,8
$20\bar{2}1$	1,3

На рис. 7 приведены дифрактограммы быстрозатвердевшей фольги сплава Zn – 2 мас. % Bi для слоев, которые прилегают к поверхности, контактирующей с кристаллизатором (поверхность A), и поверхности, противоположной ей (поверхность B). Рентгеновское излучение падало на поверхности A и B. Известно, что в слое фольги чистого цинка, прилегающем к поверхности A, наблюдаются отражения только от плоскости (0002), т. е. формируется четко выраженная текстура (0002).

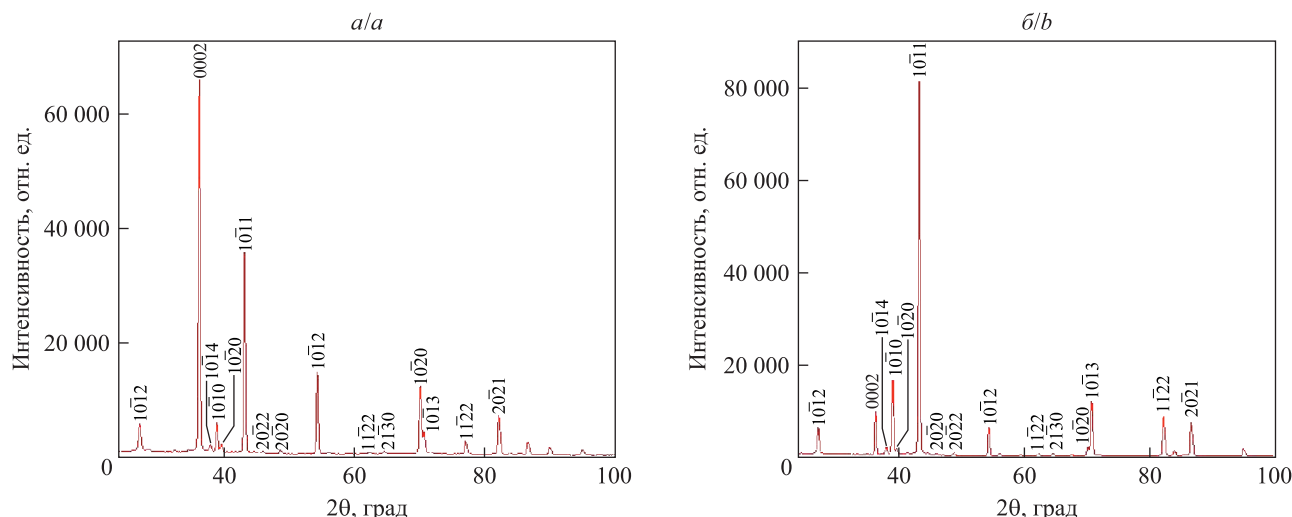


Рис. 7. Дифрактограммы быстрозатвердевшей фольги сплава Zn – 2 мас. % Bi для слоев, прилегающих к поверхности *A* (а) и поверхности *B* (б)

Fig. 7. Diffraction patterns of rapidly solidified foil of Zn – 2 wt. % Bi alloy for layers adjacent to surface *A* (a) and surface *B* (b)

В табл. 2 приведены значения полюсных плотностей дифракционных отражений цинка и висмута в быстрозатвердевшей фольге, рассчитанные по методу Харриса. Рентгеновское излучение падало на поверхности *A* и *B*. Значение полюсной плотности дифракционного отражения цинка 0002 в фольгах сплава Zn – 2 мас. % Bi является наибольшим, что свидетельствует о формировании текстуры (0002) в приповерхностных слоях фольги, прилегающих к поверхности *A*. Из всех кристаллографических плоскостей наименьшей поверхностной энергией обладает плоскость (0001), что способствует формированию текстуры (0002) цинка в сплавах на основе цинка. В слое фольги, расположенном около поверхности *B*, легирование цинка висмутом приводит к существенному уменьшению полюсной плотности дифракционного отражения (0002), что может быть вызвано изменением ориентации зерен цинка и измельчением его зеренной структуры при перемещении фронта кристаллизации. Вместе с тем наблюдается увеличение полюсных плотностей дифракционных отражений 1011 и 1122, что свидетельствует о формировании их слабовыраженной текстуры (1011) + (1122).

Ослабление текстуры (0002) цинка в быстрозатвердевшей фольге исследуемого сплава по мере перемещения фронта кристаллизации обусловлено измельчением зеренной структуры, что вызывает изменение ориентации зерен и подтверждается другими исследованиями [7].

Таблица 2

Полюсные плотности дифракционных отражений цинка и висмута в быстрозатвердевших фольгах сплава Zn – 2 мас. % Bi

Table 2

Pole densities of zinc and bismuth diffraction reflections in rapidly solidified foils of Zn – 2 wt. % Bi alloy

Дифракционное отражение	Полюсная плотность	
	Поверхность <i>A</i>	Поверхность <i>B</i>
<i>Цинк</i>		
0002	2,3	0,4
1010	1,2	0,6
1011	0,6	1,4
1012	1,1	0,6
1120	0,8	0,8
1013	1,0	0,5
1122	0,5	1,3
2020	0,5	0,4

Окончание табл. 2
Ending of the table 2

Дифракционное отражение	Полюсная плотность	
	Поверхность <i>A</i>	Поверхность <i>B</i>
<i>Висмут</i>		
$10\bar{1}2$	3,1	1,8
$10\bar{1}4$	0,4	1,4
$11\bar{2}0$	2,1	1,6
$10\bar{1}5$	0,6	0,6
$20\bar{2}0$	0,2	1,3
$20\bar{2}2$	0,6	0,6
$21\bar{3}0$	0,6	0,5
0009	0,2	0,2

В слоях быстрозатвердевшей фольги сплава Zn – 2 мас. % Bi, прилегающих к поверхностям *A* и *B*, наблюдаются текстуры висмута ($10\bar{1}2$) + ($11\bar{2}0$) и ($11\bar{2}0$) + ($10\bar{1}4$) + ($11\bar{2}0$) соответственно. Формирование компоненты текстуры ($10\bar{1}2$) в висмуте обусловлено ориентацией ковалентных связей относительно теплового потока.

Отличие структуры быстрозатвердевшей фольги от структуры массивного образца исследуемого сплава свидетельствует о различии значений их микротвердости. Отношение значения микротвердости быстрозатвердевшей фольги (402 МПа) к значению микротвердости массивного образца (309 МПа) равняется примерно 1,3. В ходе изохронного отжига быстрозатвердевшей фольги были выявлены два этапа изменения микротвердости в интервале температур 50–100 и 230–280 °C (рис. 8).

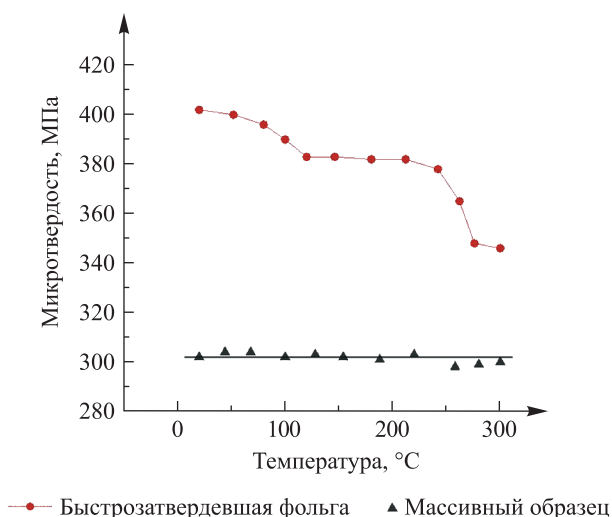


Рис. 8. Изменение микротвердости быстрозатвердевшей фольги сплава Zn – 2 мас. % Bi при изохронном отжиге

Fig. 8. Change in microhardness of rapidly solidified foil of Zn – 2 wt. % Bi alloy during isochronous annealing

Отношение значения комнатной температуры (293 K) к значению температуры плавления цинка (693 K) составляет 0,423. В связи с этим уже при комнатной температуре проявляются диффузионные процессы. Например, нагрев быстрозатвердевших фольг цинка и его сплавов с алюминием, индием, кадмием, магнием и другими элементами выше температуры 50 °C приводит к изменению микротвердости, вызванному распадом пересыщенных твердых растворов на основе цинка и последующей коалесценцией дисперсных частиц висмута фольги сплава Zn – 2 мас. % Bi. Наблюдается укрупнение частиц висмута, а также в сплаве возникают области с пониженной концентрацией висмута. По этой причине изменение микротвердости быстрозатвердевших фольг сплава Zn – 2 мас. % Bi на первом этапе обусловлено распадом твердого раствора Zn – Bi. Изменение параметра кристаллической решетки цинка

вдоль гексагональной оси определялось по смещению дифракционной линии (0004), которое составило $6 \cdot 10^{-4}$ нм. Относительное изменение параметра равняется $1,2 \cdot 10^{-3}$.

В исследуемой системе имеет место эвтектическое превращение при температуре 255 °С, находящейся в интервале температур второго этапа изменения микротвердости при изохронном отжиге. На данном этапе нагрев, плавление, затвердевание и охлаждение второй фазы происходят значительно медленнее, чем при изготовлении фольг, что обуславливает формирование улучшенной структуры и уменьшение микротвердости.

Заключение

Кристаллизация сплава Zn – 2 мас. % Bi со средней скоростью охлаждения 10 К/с вызывает образование двухкамерных, прямоугольных и гексагональных ячеек в массивных образцах в отличие от кристаллизации этого сплава со скоростью охлаждения 10^5 – 10^6 К/с, используемой при изготовлении быстрозатвердевших фольг. Средний размер зерен массивных образцов на порядок превосходит средний размер зерен быстрозатвердевших фольг. В массивных образцах формируется слабовыраженная текстура цинка (10 $\bar{1}$ 3) + (20 $\bar{2}$ 1), в быстрозатвердевших фольгах формируются текстуры цинка (0002) + (10 $\bar{1}$ 0) и (10 $\bar{1}$ 1) + (1 $\bar{1}$ 22) (в слое, прилегающем к поверхности кристаллизатора, и слое, противоположном поверхности фольги, соответственно). При изохронном отжиге быстрозатвердевших фольг сплава Zn – 2 мас. % Bi происходит уменьшение микротвердости в интервале температур 50–120 °С вследствие распада пересыщенного твердого раствора висмута в цинке и коалесценции дисперсных выделений висмута в интервале температур 50–120 °С. Изменение микротвердости в интервале температур 240–280 °С обусловлено протеканием эвтектического превращения.

Библиографические ссылки

1. Кечин ВА, Люблинский ЕЯ. *Цинковые сплавы*. Москва: Металлургия; 1986. 247 с.
2. Авраамов ЮС, Шляпин АД. *Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии: теория, технология, структура, свойства*. Москва: Интерконтакт наука; 2002. 371 с.
3. Козин ЛФ, Волков СВ, Гончаренко СГ, Ткач СВ, Данильцев БИ. Кинетика и механизм коррозионного растрескивания алюминия. *Украинский химический журнал*. 2009;75(11):3–11.
4. Shepelevich VG. Structure of rapidly solidified Al – (0.25–2.0) wt. % Bi alloys. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2023; 14(3):720–723. DOI: 10.1134/S2075113323030383.
5. Шепелевич ВГ. Получение водорода при взаимодействии быстрозатвердевших фольг сплава из алюминиевого лома и висмута с водой. *Физика и химия обработки материалов*. 2024;3:49–55. DOI: 10.30791/0015-3214-2024-3-49-55.
6. Du Y, Feng Y, Li R, Peng Z, Yao X, Duan S. Zink – bismuth binary alloy enabling high-performance aqueous zink ion batteries. *Small*. 2024;20(17):2307848. DOI: 10.1002/sml.202307848.
7. Вассерман Г, Гревен И. *Текстуры металлических материалов*. Агароник ВЯ, переводчик. Москва: Металлургия; 1969. 654 с.

Получена 10.09.2025 / исправлена 09.12.2025 / принята 15.12.2025.
Received 10.09.2025 / revised 09.12.2025 / accepted 15.12.2025.