УДК 539.2:669.(2-8)

СТРУКТУРА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕЙ ФОЛЬГИ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА Sn – 8,8 мас. % Zn

В. Г. ШЕПЕЛЕВИЧ[1)]***, Д. А. ЗЕРНИЦА***[2)]

[1)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь*
[2)]*Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина, ул. Студенческая, 28, 247760, г. Мозырь, Беларусь*

Исследована микроструктура быстрозатвердевшей фольги эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn. Фольга состоит из твердых растворов цинка и олова: темные равноосные дисперсные выделения твердого раствора цинка однородно вкраплены в матрицу из твердого раствора олова. Определены параметры микроструктуры. Средняя хорда случайной секущей на сечениях выделений твердого раствора цинка равна 0,33 мкм, удельная поверхность межфазной границы – 0,81 мкм$^{-1}$. Выделения твердого раствора олова имеют микрокристаллическую структуру, удельная поверхность межзеренных границ менее 1 мкм$^{-1}$. Проведено исследование текстуры выделений твердых растворов олова и цинка в фольге, представлены полюсные плотности дифракционных линий данных фаз. Твердый раствор олова имеет текстуру (100), а твердый раствор цинка – (0001), что объясняется преимущественным ростом зерен, у которых кристаллические плоскости (100) олова и (0001) цинка наиболее плотноупакованные и перпендикулярные тепловому потоку. Эвтектический сплав Sn – 8,8 мас. % Zn находится в неустойчивом состоянии. Отжиг фольги вызывает растворение мелких и укрупнение больших частиц твердого раствора цинка, а также распад пересыщенного твердого раствора олова. В силу указанных процессов происходит укрупнение микроструктуры: увеличение среднего размера частиц твердого раствора цинка и его объемной доли, уменьшение удельной поверхности межфазных границ.

Ключевые слова: высокоскоростное затвердевание; сплав Sn – Zn; эвтектика; микроструктура; текстура.

THE STRUCTURE OF RAPIDLY SOLIDIFIED FOIL OF THE EUTECTIC Sn – 8.8 wt. % Zn ALLOY

V. G. SHEPELEVICH[a]***, D. A. ZERNITSA***[b]

[a]*Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*
[b]*Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamiakin, 28 Studenckaja Street, Mozyr 247760, Belarus*
Corresponding author: D. A. Zernitsa (dzernitsa@mail.ru)

Microstructure of rapidly solidified eutectic alloy foil Sn – 8.8 wt. % Zn was studied. The alloy foil consists of solid solutions of zinc and tin. Dark equiaxed dispersed precipitates of zinc solid solution are uniformly interspersed in the matrix of tin solid solution. The parameters of the microstructure were determined. The average chord of a random secant

Образец цитирования:
Шепелевич ВГ, Зерница ДА. Структура быстрозатвердевшей фольги эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2020;1:67–72.
https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-1-67-72

For citation:
Shepelevich VG, Zernitsa DA. The structure of rapidly solidified foil of the eutectic Sn – 8.8 wt. % Zn alloy. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2020;1:67–72. Russian.
https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-1-67-72

Авторы:
Василий Григорьевич Шепелевич – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики твердого тела физического факультета.
Денис Александрович Зерница – аспирант кафедры физики и математики физико-инженерного факультета. Научный руководитель – В. Г. Шепелевич.

Authors:
Vasili G. Shepelevich, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of solid state physics, faculty of physics.
shepelevich@bsu.by
Denis A. Zernitsa, postgraduate student at the department of physics and mathematics, faculty of physics and engineering.
dzernitsa@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-6251-4459

at the sections of precipitates of a solid solution of zinc is 0.33 μm, and the specific interface surface is 0.81 μm^{-1}. The precipitations of the tin solid solution have a microcrystalline structure. Specific surface of high angle boundaries less than 1 μm^{-1}. The texture of the precipitates of solid solutions of tin and zinc in the foil was studied, and the pole densities of the diffraction lines of these phases are presented. The tin solid solution has the texture (100), and the zinc solid solution has the (0001) texture, which is explained by the predominant growth of grains, in which the crystalline planes of (100) tin and (0001) zinc are most closely packed and perpendicular to the heat flux. Eutectic alloy Sn – 8.8 wt. % Zn is in an unstable state. Annealing the foil causes the dissolution of small and coarsening of large particles of zinc solid solution, as well as the decomposition of a supersaturated tin solid solution. These processes cause an enlargement of the microstructure: an increase in the average particle size (d_{Zn}) of a solid solution of zinc and its volume fraction (V_{Zn}), a decrease in the specific surface (S) of interphase boundaries.

Keywords: rapidly solidification; Sn – Zn alloy; eutectic; microstructure; texture.

Введение

Сплавы системы олово – цинк активно используются в качестве защитных покрытий и припоев [1; 2], что имеет важное значение для авиа-, машиностроения и других отраслей промышленности, а также для сохранения окружающей среды и создания безопасных условий труда. Эвтектический сплав системы Sn – Zn обладает температурой плавления 185 °C, т. е. близкой к температуре плавления эвтектической системы Pb – Sn. Это дает основание рассматривать возможность замены свинцовых припоев, вредных для окружающей среды и человека, на припои, основой которых является эвтектика Sn – Zn.

В указанной системе при концентрации 8,8 мас. % Zn происходит эвтектическое превращение, и структура образующейся эвтектики существенно зависит от условий кристаллизации. В последние годы быстро развиваются нетрадиционные методы получения сплавов. К их числу относится и высокоскоростное затвердевание, позволяющее изготовить припои в виде фольги при скоростях охлаждения расплава выше 10^5 К/с [3]. Строение и физические свойства массивных образцов и быстрозатвердевших фольг существенно различаются [4]. В связи с этим нами проведены исследования структуры фольг эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn, являющиеся актуальными, имеющие научное и прикладное значение.

Методика эксперимента

Эвтектика Sn – 8,8 мас. % Zn изготовлена сплавлением компонентов в кварцевой ампуле, последующим охлаждением со скоростью 10^2 К/с при заливке в графитовую изложницу [4]. Кусочек сплава массой ≈ 0,2 г повторно расплавлялся и инжектировался на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра диаметром 20 см. Скорость охлаждения имела значение не менее $5 \cdot 10^5$ К/с [5]. Затвердевший сплав имел форму фольги, длина которой достигала 15 см, ширина – 10 мм. При проведении исследований использовалась фольга толщиной 30–100 мкм.

Микроструктура и распределение компонентов эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn изучались с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP (*Carl Zeiss*, Германия), имеющего приставки для проведения рентгеноспектрального микроанализа и фазового анализа HKL. Параметры микроструктуры найдены методом случайных секущих [6]. Для определения фазового состава и исследования текстуры зерен в фольге использовался дифрактометр. Полюсные плотности дифракционных линий олова и цинка рассчитывались по методу Харриса [7].

Результаты и их обсуждение

На рентгенограмме исследуемой фольги (рис. 1) наблюдаются только дифракционные линии олова (200, 101, 211 и др.) и цинка (0002, $10\bar{1}0$, $10\bar{1}1$, $10\bar{1}2$ и др.), т. е. быстрозатвердевший сплав состоит из твердых растворов этих металлов.

Изображение микроструктуры поперечного сечения фольги, изготовленной высокоскоростным затвердеванием эвтектического сплава (рис. 2), демонстрирует темные дисперсные выделения, вкрапленные в серую матрицу. Рентгеноспектральный микроанализ показал, что темные равноосные выделения в фольге являются твердым раствором цинка, а серые – твердым раствором олова.

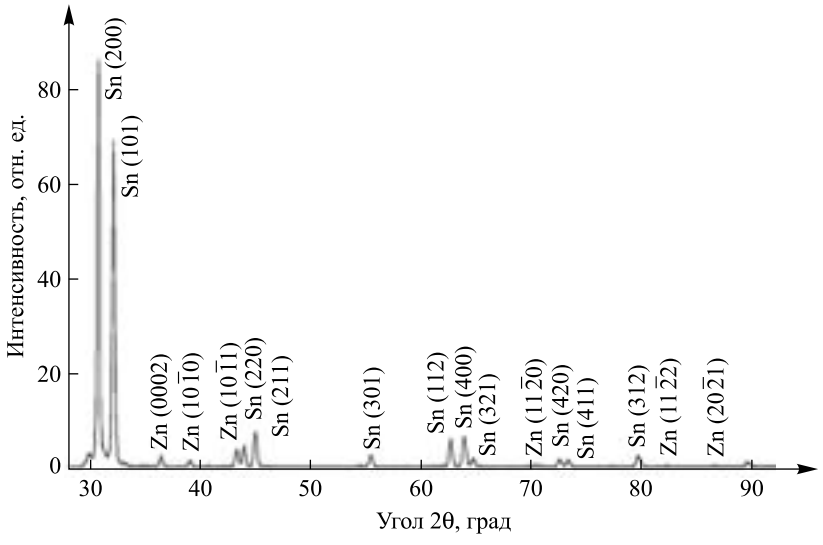


Рис. 1. Рентгенограмма быстрозатвердевшей фольги сплава Sn – 8,8 мас. % Zn
Fig. 1. X-ray diffraction pattern of rapidly solidified foil alloy Sn – 8.8 wt. % Zn

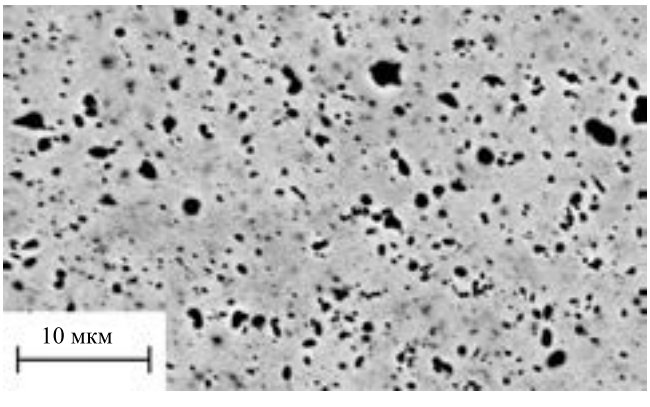


Рис. 2. Микроструктура поперечного сечения
быстрозатвердевшей фольги сплава Sn – 8,8 мас. % Zn
Fig. 2. Microstructure of the cross section
of the rapidly solidified foil alloy Sn – 8.8 wt. % Zn

Определенные методом случайных секущих параметры микроструктуры сечений твердого раствора цинка следующие: объемная доля частиц твердого раствора цинка 0,066 ± 0,006, средняя хорда случайных секущих на сечениях выделений твердого раствора цинка (0,33 ± 0,03) мкм и удельная поверхность межфазных границ (0,81 ± 0,08) мкм$^{-1}$. Как видно из рис. 3, с ростом величины размерной группы доля цинковых частиц монотонно уменьшается.

Формирование структуры фольги при высокоскоростном затвердевании (отсутствие пластин цинка, однородность распределения равноосных выделений цинка) способствует улучшению пластичности и снижению хрупкого разрушения, что имеет важное практическое значение.

Быстрозатвердевшая фольга эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn обладает микрокристаллической структурой. Изображение зеренной структуры твердого раствора олова в слое фольги, прилегающем к кристаллизатору, приведено на рис. 4.

Методом случайных секущих определено, что средняя длина D_{Sn} хорд, расположенных на сечениях зерен твердого раствора олова, составляет 2,3 мкм, удельная поверхность высокоугловых границ $S_{вуг}$ – (0,87 ± 0,08) мкм$^{-1}$, плотность ребер зерен $L_р$ – 0,23 мкм$^{-2}$. В слое фольги, прилегающем к свободной поверхности, параметры зеренной структуры следующие: D_{Sn} = (8,1 ± 0,8) мкм, $S_{вуг}$ = (0,25 ± 0,03) мкм$^{-1}$ и $L_р$ = (0,040 ± 0,004) мкм$^{-2}$.

Исследована текстура выделений в фольге твердых растворов олова и цинка, полюсные плотности дифракционных линий которых представлены в таблице.

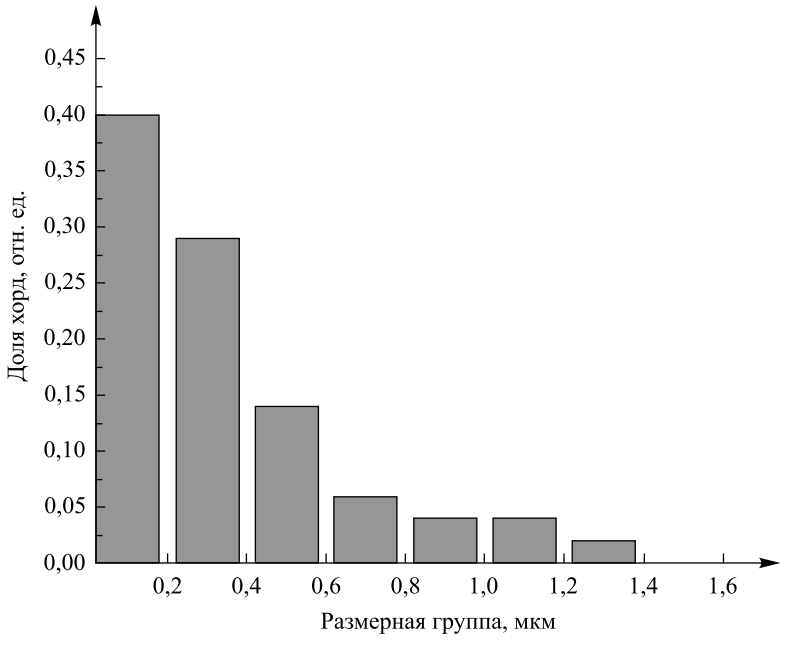


Рис. 3. Распределение хорд случайных секущих на сечениях выделений твердого раствора цинка

Fig. 3. Distribution of chords of random secants on sections of excretions of zinc solid solution

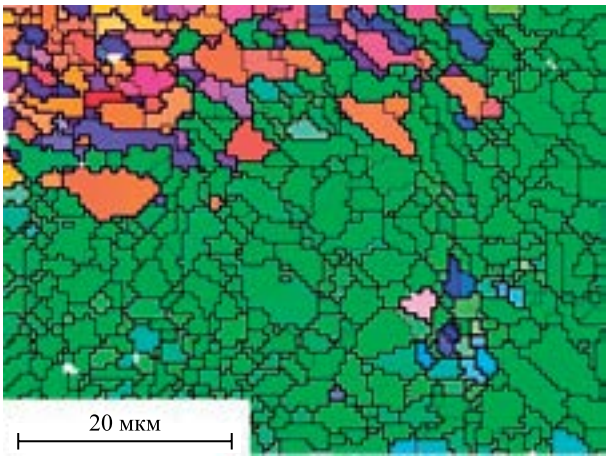


Рис. 4. Зеренная структура твердого раствора олова фольги сплава Sn – 8,8 мас. % Zn

Fig. 4. The grain structure of the solid solution of tin foil alloy Sn – 8.8 wt. % Zn

Полюсные плотности дифракционных линий твердых растворов олова и цинка для быстрозатвердевшей фольги

Pole densities of diffraction lines of tin and zinc solid solutions for rapidly solidified foil

Дифракционная линия олова	200	101	220	211	301	112	
Полюсная плотность	3,6	1,2	0,1	0,4	0,1	0,6	
Дифракционная линия цинка	0002	$10\bar{1}0$	$10\bar{1}1$	$10\bar{1}2$	$11\bar{2}0$	$10\bar{1}3$	$20\bar{2}1$
Полюсная плотность	2,4	2,3	2,3	0	0	0	0

Формирование аналогичных текстур олова и цинка наблюдалось ранее в чистых металлах [4; 8; 9], что объясняется преимущественным ростом зерен, у которых кристаллические плоскости (100) олова и (0001) цинка наиболее плотноупакованные и перпендикулярные тепловому потоку.

Быстрозатвердевшая фольга эвтектики Sn – 8,8 мас. % Zn находится в неустойчивом состоянии. Методами растровой микроскопии и металлографического анализа установлено, что отжиг фольг вызывает растворение мелких и укрупнение больших частиц твердого раствора цинка. Указанные процессы обусловливают укрупнение микроструктуры. Так, при отжиге 180 °С происходит увеличение размера выделений твердого раствора цинка d_{Zn} и его объемной доли V_{Zn} в сплаве и уменьшение удельной поверхности S межфазной границы (рис. 5).

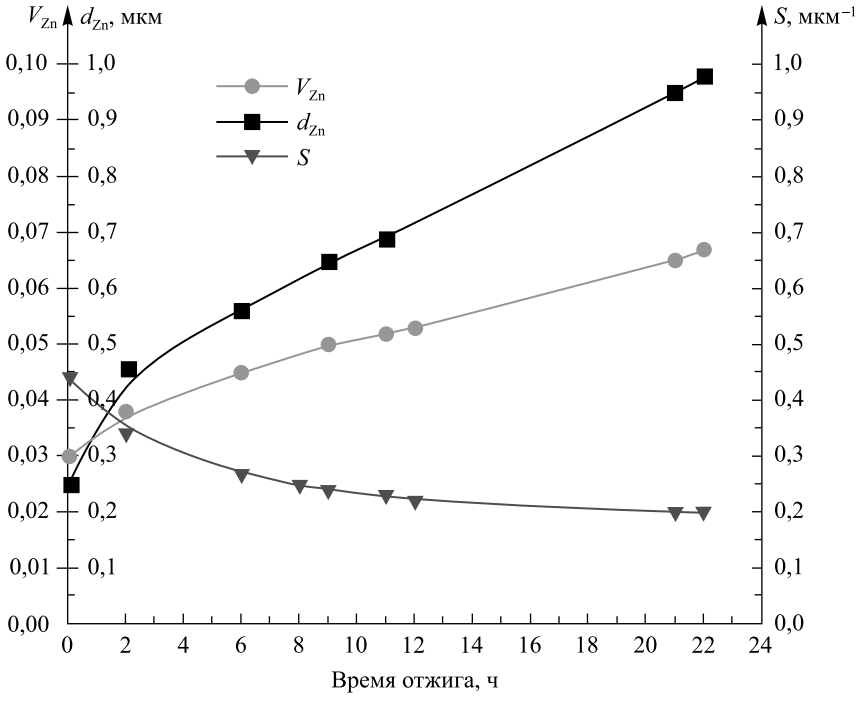


Рис. 5. Влияние отжига при 180 °С на параметры микроструктуры фольги эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn

Fig. 5. The effect of annealing at 180 °C on the microstructure parameters of the foil of the eutectic alloy Sn – 8.8 wt. % Zn

Таким образом, эвтектический сплав Sn – 8,8 мас. % Zn, полученный высокоскоростным затвердеванием, состоит из дисперсных выделений твердого раствора цинка, распределенных однородно в твердом растворе олова. В фольге формируется микрокристаллическая структура, текстура (100) в твердом растворе олова и текстура (0001) в твердом растворе цинка. Быстрозатвердевшая фольга находится в неустойчивом состоянии, и при температуре 180 °С происходит растворение мелких и рост крупных частиц твердого раствора цинка. Отсутствие в фольге пластинчатых выделений цинка улучшает ее пластичность и уменьшает способность к хрупкому разрушению, что имеет важное практическое значение.

Библиографические ссылки

1. Кечин ВА, Люблинский ЕЯ. *Цинковые сплавы.* Москва: Металлургия; 1986. 247 с.

2. Захаров АМ. *Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие.* Москва: Металлургия; 1980. 256 с.

3. Васильев ВА, Митин БС, Пашков ИН, Серов ММ, Скуридин АА, Лукин АА и др. *Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы).* Москва: Интермет инжиниринг; 1998. 400 с.

4. Шепелевич ВГ. *Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы.* Минск: БГУ; 2015. 192 с.

5. Мирошниченко ИС. *Закалка из жидкого состояния.* Москва: Металлургия; 1982. 168 с.

6. Салтыков СА. *Стереометрическая металлография (стереология металлических материалов).* Москва: Металлургия; 1976. 270 с.

7. Русаков АА. *Рентгенография металлов.* Москва: Атомиздат; 1977. 488 с.

8. Лозенко ВВ, Шепелевич ВГ. Зеренная и субзеренная структура быстрозатвердевших фольг цинка и его бинарных сплавов с Cd, Sn и Sb. *Неорганические материалы.* 2007;43(1):22–26.

9. Шепелевич ВГ, Гусакова ОВ. Структура и свойства быстрозатвердевших фольг системы Sn – Zn. *Неорганические материалы.* 2008;44(5):560–564.

References

1. Kechin VA, Lublinski EY. *Tsinkovye splavy* [Zinc Alloys]. Moscow: Metallurgiya; 1986. 247 p. Russian.

2. Zakharov AM. *Promyshlennye splavy tsvetnykh metallov. Fazovyi sostav i strukturnye sostavlyayushchie* [Industrial alloys of non-ferrous metals]. Moscow: Metallurgiya; 1980. 256 p. Russian.

3. Vasil'ev VA, Mitin BS, Pashkov IN, Serov MM, Skuridin AA, Lukin AA, et al. *Vysokoskorostnoe zatverdevanie rasplava (teoriya, tekhnologiya i materialy)* [High-rate melt solidification (theory, technology, materials)]. Moscow: Intermet inzhiniring; 1998. 400 p. Russian.

4. Shepelevich VG. *Bystrozatverdevshie legkoplavkie splavy* [Rapidly solidified fusible alloys]. Minsk: Belarusian State University; 2015. 192 p. Russian.

5. Miroshnichenko IS. *Zakalka iz zhidkogo sostoyaniya* [Quenching from the liquid state]. Moscow: Metallurgiya; 1982. 168 p. Russian.

6. Saltykov SA. *Stereometricheskaya metallografiya (stereologiya metallicheskikh materialov)* [Stereometric metallography (stereology of metallic materials)]. Moscow: Metallurgiya; 1976. 270 p. Russian.

7. Rusakov AA. *Rentgenografiya metallov* [X-ray diffraction analysis of metals]. Moscow: Atomizdat; 1977. 488 p. Russian.

8. Lozenko VV, Shepelevich VG. [Grain and subgrain structure of rapidly solidified Zn, Zn – Cd, Zn – Sn, and Zn – Sb foils]. *Neorganicheskie materialy.* 2007;43(1):22–26. Russian.

9. Shepelevich VG, Gusakova OV. [Structure and properties of rapidly solidified Sn – Zn foils]. *Neorganicheskie materialy.* 2008;44(5):560–564. Russian.

Статья поступила в редколлегию 24.12.2019.
Received by editorial board 24.12.2019.