



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-36-39>
УДК 621.745.35

Поступила 20.03.2024
Received 20.03.2024

МЕХАНИЗМ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ БИНАРНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ И ОЛОВЯННЫХ БРОНЗ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

А. В. СТЕЦЕНКО, МОУВО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43

Разработан наноструктурный механизм перекристаллизации бинарных алюминиевых и оловянных бронз. Сначала из элементарных нанокристаллов меди, алюминия, олова и их свободных атомов образуются структурообразующие нанокристаллы α -, β - и γ -фаз. Из них формируются центры кристаллизации микрокристаллов фаз. Из этих центров, структурообразующих нанокристаллов фаз, свободных атомов меди, алюминия, олова образуются микрокристаллы α -, β - и γ -фаз бинарных алюминиевых и оловянных бронз.

Ключевые слова. Алюминиевые бронзы, оловянные бронзы, перекристаллизация, наноструктурные процессы, центры кристаллизации, нанокристаллы.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Механизм перекристаллизации бинарных алюминиевых и оловянных бронз / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2024. № 2. С. 36–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-36-39>.

THE MECHANISM OF RECRYSTALLIZATION OF BINARY ALUMINUM AND TIN BRONZES

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Minsk, Belarus, 24, Ya. Kolas str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

A. V. STETSENKO, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.

A nanostructural mechanism for recrystallization of binary aluminum and tin bronzes has been developed. First, structure-forming nanocrystals of α -phases, β -phases and γ -phases are formed from elementary nanocrystals of copper, aluminum, tin and their free atoms. The crystallization centers of microcrystals of phases are formed from them. From these centers, structure-forming nanocrystals of phases, free atoms of copper, aluminum, tin, microcrystals of α -phases, β -phases and γ -phases of binary aluminum and tin bronzes are formed.

Keywords. Aluminum bronzes, tin bronzes, recrystallization, nanostructural processes, crystallization centers, nanocrystals.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. The mechanism of recrystallization of binary aluminum and tin bronzes. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 2, pp. 36–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-36-39>.

Согласно диаграмме состояния Cu – Al, фазовые превращения при перекристаллизации бинарных алюминиевых бронз происходят по следующей эвтектоидной реакции [1]:



где $\beta_{\text{МК1}}$, $\alpha_{\text{МК1}}$ и $\gamma_{2\text{МК}}$ – микрокристаллы β -, α - и γ_2 -фазы.

Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки $\beta_{\text{МК1}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы меди ($\text{Cu}_{\text{ЭН1}}$) и алюминия ($\text{Al}_{\text{ЭН1}}$), свободные атомы меди ($\text{Cu}_{\text{а1}}$) и алюминия ($\text{Al}_{\text{а1}}$) [2].

Процесс кристаллизации $\beta_{\text{МК1}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\beta_{\text{СН1}}$) по реакции:



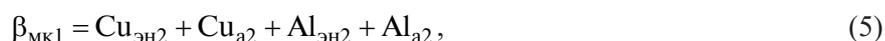
Затем образуются центры кристаллизации ($\beta_{\text{ЦК1}}$) по реакции:



Заканчивается процесс кристаллизации $\beta_{\text{МК1}}$ по реакции:



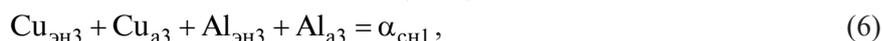
При температуре 565 °С происходит распад $\beta_{\text{МК1}}$:



где $\text{Cu}_{\text{ЭН2}}$ и $\text{Al}_{\text{ЭН2}}$ – элементарные нанокристаллы меди и алюминия; $\text{Cu}_{\text{а1}}$ и $\text{Al}_{\text{а2}}$ – свободные атомы меди и алюминия.

Образование $\alpha_{\text{МК1}}$ является наноструктурным процессом и происходит следующим образом [4].

Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\alpha_{\text{СН1}}$) по реакции:



где $\text{Cu}_{\text{ЭН3}}$ и $\text{Al}_{\text{ЭН3}}$ – элементарные нанокристаллы меди и алюминия; $\text{Cu}_{\text{а3}}$ и $\text{Al}_{\text{а3}}$ – свободные атомы меди и алюминия.

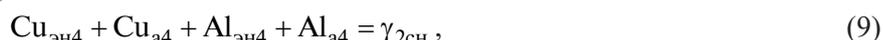
Затем образуются центры кристаллизации ($\alpha_{\text{ЦК1}}$) по следующей реакции:



Заканчивается процесс формирования $\alpha_{\text{МК1}}$ по реакции:



Аналогично образование $\gamma_{2\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\gamma_{2\text{СН}}$) по реакции:



где $\text{Cu}_{\text{ЭН4}}$ и $\text{Al}_{\text{ЭН4}}$ – элементарные нанокристаллы меди и алюминия; $\text{Cu}_{\text{а4}}$ и $\text{Al}_{\text{а4}}$ – свободные атомы меди и алюминия.

Затем образуются центры кристаллизации ($\gamma_{2\text{ЦК}}$) по следующей реакции:



Заканчивается процесс формирования $\gamma_{2\text{МК}}$ по реакции:



При этом справедливы следующие уравнения:



Согласно диаграмме состояния Cu – Sn, фазовые превращения при перекристаллизации бинарных оловянных бронз происходят по эвтектоидной реакции [1]:



где $\beta_{\text{МК2}}$, $\alpha_{\text{МК2}}$ и $\gamma_{\text{МК}}$ – микрокристаллы β -, α - и γ - фазы.

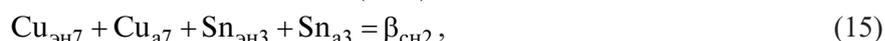
Микрокристаллы $\beta_{\text{МК2}}$ образуются по реакции:



где $\alpha_{\text{МК}}$ и $\beta_{\text{МК2}}$ – микрокристаллы α - и β - фазы; L – расплав.

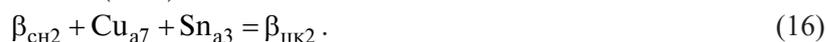
Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки $\alpha_{\text{МК}}$ распадается на элементарные нанокристаллы меди ($\text{Cu}_{\text{ЭН5}}$) и олова ($\text{Sn}_{\text{ЭН1}}$), свободные атомы меди ($\text{Cu}_{\text{а5}}$) и олова ($\text{Sn}_{\text{а1}}$) [2]. Расплав L состоит из элементарных нанокристаллов меди ($\text{Cu}_{\text{ЭН6}}$) и олова ($\text{Sn}_{\text{ЭН2}}$), свободных атомов меди ($\text{Cu}_{\text{а6}}$) и олова ($\text{Sn}_{\text{а2}}$) [2].

Процесс кристаллизации $\beta_{\text{МК2}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\beta_{\text{СН2}}$) по реакции:



где $\text{Cu}_{\text{ЭН7}}$ и $\text{Sn}_{\text{ЭН3}}$ – элементарные нанокристаллы меди и олова; $\text{Cu}_{\text{а7}}$ и $\text{Sn}_{\text{а3}}$ – свободные атомы меди и олова.

Затем образуются центры кристаллизации ($\beta_{\text{цк2}}$) по реакции:



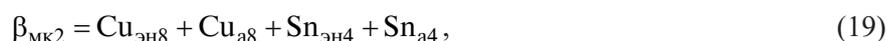
Заканчивается процесс формирования $\beta_{\text{МК2}}$ по реакции:



При этом справедливы следующие уравнения:



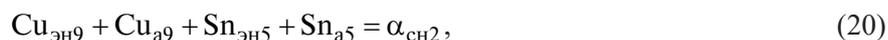
При температуре 586 °С происходит распад $\beta_{\text{МК2}}$:



где $\text{Cu}_{\text{эн8}}$ и $\text{Sn}_{\text{эн4}}$ – элементарные нанокристаллы меди и олова; $\text{Cu}_{\text{а8}}$ и $\text{Sn}_{\text{а4}}$ – свободные атомы меди и олова.

Образование $\alpha_{\text{МК2}}$ является наноструктурным процессом и происходит следующим образом [4].

Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\alpha_{\text{сн2}}$) по реакции:



где $\text{Cu}_{\text{эн9}}$ и $\text{Sn}_{\text{эн5}}$ – элементарные нанокристаллы меди и олова; $\text{Cu}_{\text{а9}}$ и $\text{Sn}_{\text{а5}}$ – свободные атомы меди и олова.

Затем образуются центры кристаллизации ($\alpha_{\text{цк2}}$) по реакции:



Заканчивается процесс формирования $\alpha_{\text{МК2}}$ по реакции:



Аналогично образование $\gamma_{\text{МК}}$ будет происходить следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\gamma_{\text{сн}}$) по реакции:



где $\text{Cu}_{\text{эн10}}$ и $\text{Sn}_{\text{эн6}}$ – элементарные нанокристаллы меди и олова; $\text{Cu}_{\text{а10}}$ и $\text{Sn}_{\text{а6}}$ – свободные атомы меди и олова.

Затем образуются центры кристаллизации ($\gamma_{\text{цк}}$) по реакции:



Заканчивается процесс формирования $\gamma_{\text{МК}}$ по реакции:



При этом справедливы следующие уравнения:



Таким образом, механизм перекристаллизации бинарных алюминиевых и оловянных бронз является наноструктурным, в котором основную роль играют элементарные нанокристаллы меди, алюминия и олова, структурообразующие нанокристаллы α -, β - и γ - фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справ. – М.: Наука, 1979. – 248 с.
2. Марукович, Е.И. Наноструктурная теория металлических расплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 7–9.
3. Марукович, Е.И. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 13–19.

4. **Марукович, Е. И.** Наноструктурные фазовые превращения при эвтектонидных реакциях бинарных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 4. – С. 30–32.

REFERENCES

1. **1.** *Dvojnye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi: spravochnik* [Dual and multicomponent copper-based systems: reference]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 248 p.
2. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov [Nanostructural theory of metallic melts]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
3. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Nanostrukturnaya kristallizaciya litejnyh spлавov [Nanostructural crystallization of foundry alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 13–19.
4. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Nanostrukturnye fazovye prevrashcheniya pri evtektoidnyh reakciyah binarnykh spлавov [Nanostructural phase transformations in eutectoid reactions of binary alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 30–32.