



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-40-42>  
УДК 621.745.35

Поступила 20.12.2021  
Received 20.12.2021

## НАНОСТРУКТУРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СИЛУМИНОВ

*Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: stetsenko.52@bk.ru*

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

*Показано, что кристаллизация силуминов является наноструктурным процессом. Жидкий силумин состоит из элементарных нанокристаллов алюминия и кремния, свободных атомов алюминия и кремния, алюминиево-кремниевых комплексов. Из них формируются первичные микрокристаллы. Эвтектические микрокристаллы образуются из элементарных нанокристаллов кремния и алюминия, алюминиево-кремниевых комплексов.*

**Ключевые слова.** Силумины, кристаллизация, наноструктурный процесс, нанокристаллы, свободные атомы, микрокристаллы, алюминиево-кремниевые комплексы.

**Для цитирования.** Марукович, Е.И. Наноструктурная кристаллизация силуминов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // *Литье и металлургия*. 2022. №1. С. 40–42. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-40-42>.

## NANOSTRUCTURAL CRYSTALLIZATION OF SILUMINS

*E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru*

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

*The crystallization of silumins has been shown to be a nanostructured process. Liquid silumin consists of elementary nanocrystals of aluminum and silicon, free atoms of aluminum and silicon, aluminum-silicon complexes. Primary microcrystals are formed from them. Eutectic microcrystals are formed from elementary nanocrystals of silicon and aluminum, aluminum-silicon complexes.*

**Keywords.** Silumins, crystallization, nanostructural process, nanocrystals, free atoms, microcrystals, aluminum-silicon complexes.

**For citation.** Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostructural crystallization of silumins. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 40–42. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-40-42>

Кристаллизация металлов является наноструктурным процессом [1]. Силумины – это алюминиево-кремниевые сплавы, содержащие эвтектику. Относительно нее различают доэвтектические, эвтектические и заэвтектические силумины. Алюминиево-кремниевая эвтектика формируется при кристаллизации расплава, содержащего 12 ат. % кремния [2].

Силумины можно получать растворением кремния в жидком алюминии. При плавлении алюминия происходит реакция [3]:



где  $\text{Al}_{\text{МК}}$  – микрокристаллы алюминия;  $\text{Al}_{\text{а}}$  – свободные атомы алюминия;  $m_1$  и  $n_1$  – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов алюминия;  $\Delta H_{\text{па}}$  – молярная энтальпия плавления алюминия.

$\Delta H_{\text{па}} = 10,8$  кДж/моль, а молярная энтальпия сублимации (атомизации) алюминия ( $\Delta H_{\text{са}}$ ) составляет 329,8 кДж/моль [4]. Атомная концентрация свободных атомов алюминия при плавлении определяется следующим уравнением [3]:

$$n_1 = \frac{\Delta H_{\text{па}}}{\Delta H_{\text{са}}}. \quad (2)$$

Подставляя исходные данные в (2), получаем  $n_1 = 3$  ат.%. Соответственно  $m_1 = 97$  ат. %.

При плавлении кремния происходит реакция, аналогичная (1):



где  $Si_{МК}$  – микрокристаллы кремния;  $Si_{ЭН}$  – элементарные нанокристаллы кремния;  $Si_a$  – свободные атомы кремния;  $m_2$  и  $n_2$  – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов кремния;  $\Delta H_{ПК}$  – молярная энтальпия плавления кремния.

$\Delta H_{ПК} = 50$  кДж/моль, а молярная энтальпия сублимации (атомизации) кремния ( $\Delta H_{СК}$ ) составляет 452,5 кДж/моль [4]. Атомная концентрация свободных атомов кремния при плавлении определяется уравнением [3]:

$$n_2 = \frac{\Delta H_{ПК}}{\Delta H_{СК}}. \quad (4)$$

Подставляя исходные данные в (4), получаем  $n_2 = 11$  ат.%. Соответственно  $m_2 = 89$  ат.%. Атомы кремния являются связующими нанокристаллов кремния.

При растворении кремния в жидком алюминии происходит взаимодействие  $Al_a$  с  $Si_a$  с образованием алюминиево-кремниевых комплексов (АКК). В результате микрокристаллы кремния распадаются на элементарные нанокристаллы по реакции:



После растворения кремния в жидком эвтектическом силумине содержится 86,4 ат.%  $Al_{ЭН}$ ; 10,7 ат.%  $Si_{ЭН}$ ; 2,9 ат.% АКК. Элементарными АКК являются соединения  $Al_2Si$ .

В результате эвтектической реакции расплав распадается на 11%  $\beta_{Si}$ -фазы с концентрацией алюминия 0,5 ат.% и 89%  $\alpha$ -фазы с концентрацией кремния 1,6 ат.% [2, 5, 6]. Тогда образование микрокристаллов  $\alpha$ -фазы ( $\alpha_{МК}$ ) при эвтектической реакции происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы  $\alpha$ -фазы ( $\alpha_{СН}$ ):



Затем образуются центры кристаллизации  $\alpha$ -фазы ( $\alpha_{ПК}$ ):



Заканчивается процесс формированием  $\alpha_{МК}$  по следующей реакции:



Образование микрокристаллов  $\beta_{Si}$ -фазы ( $\beta_{МК}$ ) при эвтектической реакции происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы  $\beta_{Si}$ -фазы ( $\beta_{СН}$ ) по следующей реакции:



Затем образуются центры кристаллизации  $\beta_{Si}$ -фазы ( $\beta_{ПК}$ ):



Заканчивается процесс образованием  $\beta_{МК}$  по реакции:



Можно считать, что кристаллизация эвтектического силумина происходит по реакциям (6) – (11).

При кристаллизации доэвтектического силумина в первую очередь образуются микрокристаллы первичной  $\alpha$ -фазы ( $\alpha_{МКП}$ ), а затем – алюминиево-кремниевая эвтектика.  $\alpha_{МКП}$  формируются следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы первичной  $\alpha$ -фазы ( $\alpha_{СНП}$ ) по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации первичной  $\alpha$ -фазы ( $\alpha_{ПКП}$ ):



Заканчивается процесс образованием  $\alpha_{МКП}$  по реакции:



Алюминиево-кремниевая эвтектика формируется по реакциям (6) – (11).

При кристаллизации заэвтектического силумина в первую очередь формируются микрокристаллы первичной  $\beta_{Si}$ -фазы ( $\beta_{МКП}$ ), а затем – алюминиево-кремниевая эвтектика.  $\beta_{МКП}$  образуются следующим

образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы первичной  $\beta_{Si}$ -фазы ( $\beta_{снп}$ ) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации первичной  $\beta_{Si}$ -фазы ( $\beta_{цкп}$ ):



Заканчивается процесс формированием  $\beta_{мкп}$  по следующей реакции:



Алюминиево-кремниевая эвтектика образуется по реакциям (6) – (11).

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В.** Наноструктурная кристаллизация металлов // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 23–26.
2. **Строганов Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б.** Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
3. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Наноструктурная теория металлических расплавов // *Литье и металлургия*. 2020. № 3. С. 7–9.
4. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
5. **Эллиот Р. П.** Структура двойных сплавов: справ. М.: Металлургия, 1970. 456 с.
6. **Немененок Б. М.** Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. Минск: Технопринт, 1999. 272 с.

### REFERENCES

1. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Nanostrukturnaya kristallizaciya metallov [Nanostructured crystallization of metals]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 23–26.
2. **Stroganov G. B., Rotenberg V. A., Gershman G. B.** *Splavy alyuminiya s kremniem* [Aluminium-silicon alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977, 272 p.
3. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov [Nanostructural theory of metal melts]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
4. *Svoystva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svoystva: Spravochnik* [Item Properties. Part 1. Physical Properties: Book]. Pod red. G. V. Samsonova. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
5. **Elliot R. P.** *Struktura dvojnyh splavov: Spravochnik* [Double Alloy Structure: Book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 456 p.
6. **Nemenenok B. M.** *Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov* [Theory and practice of complex modification of silumins]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 1999, 272 p.