



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-10-12>
УДК 621.745.35

Поступила 24.09.2024
Received 24.09.2024

НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВО–МЕДНО–КРЕМНИЕВЫХ СПЛАВОВ И ИХ СТРУКТУРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ПЕРЕПЛАВКЕ

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

Основными структурными элементами расплавов литейных алюминийно-медно-кремниевых сплавов являются элементарные нанокристаллы алюминия, меди, кремния и их свободные атомы. Кристаллизующиеся фазы этих сплавов – микрокристаллы α -фаз, кремния и θ -фазы. Процесс их кристаллизации наноструктурный. Сначала из элементарных нанокристаллов и свободных атомов образуются структурообразующие нанокристаллы. Затем из них формируются центры кристаллизации микрокристаллов фаз. Из них, структурообразующих нанокристаллов и свободных атомов алюминия, меди, кремния образуются микрокристаллы α -фаз, кремния и θ -фазы. Показано, что структурная устойчивость при переплавке литейных алюминийно-медно-кремниевых сплавов обратно пропорциональна концентрациям адсорбированных атомов водорода и кислорода.

Ключевые слова. Алюминийно-медно-кремниевые сплавы, наноструктурные процессы, структурная устойчивость, кристаллизация, переплавка.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Наноструктурирование при кристаллизации литейных алюминийно-медно-кремниевых сплавов и их структурная устойчивость при переплавке / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // *Литье и металлургия*. 2024. № 4. С. 10–12. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-10-12>.

NANOSTRUCTURING DURING CRYSTALLIZATION OF CAST ALUMINUM–COPPER–SILICON ALLOYS AND THEIR STRUCTURAL STABILITY DURING REMELTING

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.

The main structural elements of melts of foundry aluminum-copper-silicon alloys are elementary nanocrystals of aluminum, copper, silicon and their free atoms. The main crystallizing phases of these alloys are microcrystals of α -phases, silicon and θ -phases. The process of their crystallization is nanostructural. First, structure-forming nanocrystals are formed from elementary nanocrystals and free atoms. Then the centers of crystallization of microcrystals of phases are formed from them. From them, the structure-forming nanocrystals of free atoms of aluminum, copper, and silicon, microcrystals of α -phases, silicon, and θ -phases are formed. It is shown that the structural stability during remelting of cast aluminum-copper-silicon alloys is inversely proportional to the concentrations of adsorbed hydrogen and oxygen atoms.

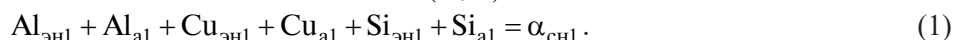
Keywords. Aluminum-copper-silicon alloys, nanostructural processes, structural stability, crystallization, remelting.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostructuring during crystallization of cast aluminum-copper-silicon alloys and their structural stability during remelting. *Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 4, pp. 10–12. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-10-12>.

Основными структурными составляющими при кристаллизации литейных алюминийно-медно-кремниевых сплавов (АМКС) являются первичные микрокристаллы α -фазы ($\alpha_{МК1}$); двойная эвтектика, состоящая из микрокристаллов α -фазы ($\alpha_{МК2}$) и кремния ($Si_{МК1}$); тройная эвтектика, состоящая из микрокристаллов α -фазы ($\alpha_{МК3}$), кремния ($Si_{МК2}$) и θ -фазы ($\theta_{МК}$) [1].

Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки литейных АМКС $\alpha_{МК1}$ распадаются на элементарные нанокристаллы алюминия ($Al_{ЭН1}$), меди ($Cu_{ЭН1}$) и кремния ($Si_{ЭН1}$), свободные атомы алюминия (Al_{a1}), меди (Cu_{a1}) и кремния (Si_{a1}) [2].

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



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

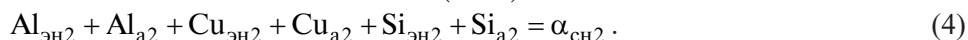


Заканчивается процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МК1}}$ реакцией:

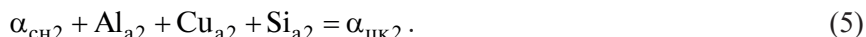


Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки литейных АМКС $\alpha_{\text{МК2}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы алюминия ($\text{Al}_{\text{ЭН2}}$), меди ($\text{Cu}_{\text{ЭН2}}$) и кремния ($\text{Si}_{\text{ЭН2}}$), свободные атомы алюминия ($\text{Al}_{\text{а2}}$), меди ($\text{Cu}_{\text{а2}}$) и кремния ($\text{Si}_{\text{а2}}$) [2].

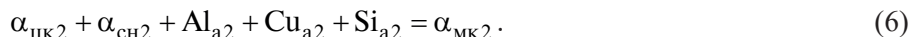
Процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МК2}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\alpha_{\text{СН2}}$):



Затем образуются центры кристаллизации ($\alpha_{\text{ЦК2}}$):



Заканчивается процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МК2}}$ реакцией:



Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки литейных АМКС $\text{Si}_{\text{МК1}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы кремния ($\text{Si}_{\text{ЭН3}}$) и свободные атомы кремния ($\text{Si}_{\text{а3}}$) [2].

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



Затем образуются центры кристаллизации ($\text{Si}_{\text{ЦК1}}$):

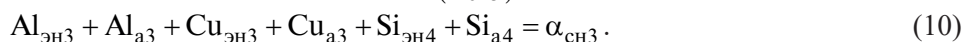


Заканчивается процесс кристаллизации $\text{Si}_{\text{МК1}}$ реакцией:

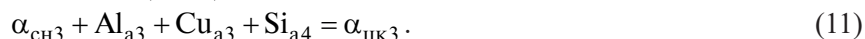


Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки литейных АМКС $\alpha_{\text{МК3}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы алюминия ($\text{Al}_{\text{ЭН3}}$), меди ($\text{Cu}_{\text{ЭН3}}$) и кремния ($\text{Si}_{\text{ЭН4}}$), свободные атомы алюминия ($\text{Al}_{\text{а3}}$), меди ($\text{Cu}_{\text{а3}}$) и кремния ($\text{Si}_{\text{а4}}$) [2].

Процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МК3}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\alpha_{\text{СН3}}$):



Затем образуются центры кристаллизации ($\alpha_{\text{ЦК3}}$):



Заканчивается процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МК3}}$ реакцией:



Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки литейных АМКС $\text{Si}_{\text{МК2}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы кремния ($\text{Si}_{\text{ЭН5}}$) и свободные атомы кремния ($\text{Si}_{\text{а5}}$) [2].

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



Затем образуются центры кристаллизации ($\text{Si}_{\text{ЦК2}}$):

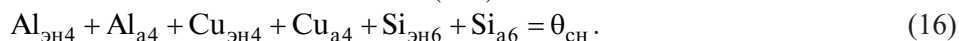


Заканчивается процесс кристаллизации $\text{Si}_{\text{МК2}}$ реакцией:



Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки литейных АМКС $\theta_{\text{МК}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы алюминия ($\text{Al}_{\text{ЭН4}}$), меди ($\text{Cu}_{\text{ЭН4}}$) и кремния ($\text{Si}_{\text{ЭН6}}$), свободные атомы алюминия ($\text{Al}_{\text{а4}}$), меди ($\text{Cu}_{\text{а4}}$) и кремния ($\text{Si}_{\text{а6}}$) [2].

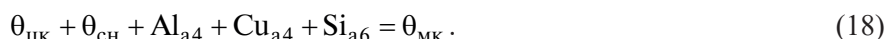
Процесс кристаллизации $\theta_{\text{МК}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\theta_{\text{СН}}$):



Затем образуются центры кристаллизации ($\theta_{\text{ЦК}}$):

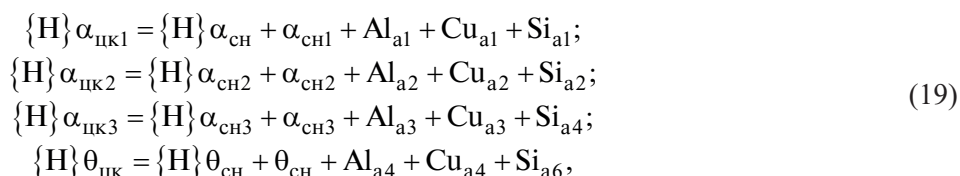


Заканчивается процесс кристаллизации $\theta_{\text{МК}}$ реакцией:



В расплавах литейных алюминиево-кремниевых сплавов растворяются атомы водорода и кислорода, причем атомарный водород адсорбируется центрами кристаллизации микрокристаллов α -фазы, а атомарный кислород – центрами кристаллизации микрокристаллов кремния [4].

При увеличении перегревов и (или) времени выдержки расплавов литейных АМКС в них повышаются концентрации атомов водорода и кислорода. Растворенные в жидких литейных АМКС атомы водорода адсорбируются $\alpha_{\text{ЦК1}}$, $\alpha_{\text{ЦК2}}$, $\alpha_{\text{ЦК3}}$, $\theta_{\text{МК}}$ до определенных, критических концентраций. При их превышении происходит распад этих центров кристаллизации по эффекту Ребиндера в соответствии со следующими реакциями:



где $\{H\}$ – адсорбированные атомы водорода.

Растворенные в расплавах литейных АМКС атомы кислорода адсорбируются $\text{Si}_{\text{ЦК1}}$ и $\text{Si}_{\text{ЦК2}}$ до определенных критических концентраций. При их превышении происходит распад этих центров кристаллизации по эффекту Ребиндера в соответствии с реакциями:



где $\{O\}$ – адсорбированные атомы кислорода.

Таким образом, структурная устойчивость при переплавке литейных алюминиево-медно-кремниевых сплавов определяется устойчивостью центров кристаллизации микрокристаллов α -фаз, кремния и θ -фазы, которая зависит от концентрации адсорбированных атомов водорода и кислорода. Эти концентрации повышаются при увеличении перегревов и (или) времени выдержки расплавов, что приводит к распаду центров кристаллизации микрокристаллов α -фаз, кремния и θ -фазы по эффекту Ребиндера и снижению структурной устойчивости при переплавке литейных алюминиево-медно-кремниевых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник / А. В. Курдюмов [и др.]. М.: МИСиС, 2011. – 615 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. О модифицировании силуминов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 41–46.

REFERENCES

1. Kurdyumov A.V., Belov V.D., Pikunov M.V. *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov: uchebnik* [Production of castings from non-ferrous metal alloys: textbook]. Moscow, MISiS Publ., 2011, 615 p.
2. 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.
3. Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A.V. *Nanostrukturnaya kristallizatsiya litejnyh splavov* [Nanostructured crystallization of casting 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. *O modifitsirovanii siluminov* [On modification of silumins]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 4, pp. 41–46.