

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЛИТЕЙНЫХ БИНАРНЫХ СПЛАВОВ – НАНОСТРУКТУРНЫЙ ПРОЦЕСС

Стеценко В.Ю.¹, Стеценко А.В.²

¹Стеценко Владимир Юзефович – доктор технических наук,

²Стеценко Андрей Владимирович – магистр,
Институт технологии металлов НАН Беларуси,
Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь,
г. Могилев, Республика Беларусь

Аннотация: кристаллизация и перекристаллизация литейных бинарных сплавов являются наноструктурными процессами. Сначала из элементарных нанокристаллов и свободных атомов компонентов А и В литейных сплавов образуются структурообразующие нанокристаллы кристаллизующихся фаз. Затем из структурообразующих нанокристаллов и свободных атомов компонентов А и В литейных сплавов формируются центры кристаллизации микрокристаллов фаз. Из этих центров, структурообразующих нанокристаллов и свободных атомов компонентов А и В литейных сплавов образуются микрокристаллы фаз литейных бинарных сплавов.

Ключевые слова: наноструктурные процессы, кристаллизация, перекристаллизация, литейные сплавы, нанокристаллы, микрокристаллы, атомы.

CRYSTALLIZATION AND RECRYSTALLIZATION OF CAST BINARY ALLOYS - NANOSTRUCTURE PROCESS

Stetsenko V.Yu.¹, Stetsenko A.V.²

¹Stetsenko Vladimir Yuzefovich – Dr. of Engineering Science,

²Stetsenko Andrey Vladimirovich – Master,
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF METALS OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS, ASSOCIATION
OF FOUNDRYMEN AND METALLURGISTS OF BELARUS,
MOGILEV, REPUBLIC OF BELARUS

Abstract: crystallization and recrystallization of cast binary alloys are nanostructured processes. First, structure-forming nanocrystals of crystallizing phases are formed from elementary nanocrystals and free atoms of components A and B. Then, crystallization centers of phase microcrystals are formed from structure-forming nanocrystals and free atoms of components A and B. Microcrystals of phases of casting binary alloys are formed from these centers, structure-forming nanocrystals and free atoms of components A and B.

Keywords: nanostructural processes, crystallization, recrystallization, casting alloys, nanocrystals, microcrystals, atoms.

УДК 621.745.35

Литейные бинарные сплавы (ЛБС) в основном кристаллизуются с образованием эвтектики. При этом структурными составляющими ЛБС являются первичные микрокристаллы α -фаз ($\alpha_{\text{МКП}}$) и β -фаз ($\beta_{\text{МКП}}$), эвтектические микрокристаллы α -фаз ($\alpha_{\text{МКЭ}}$) и β -фаз ($\beta_{\text{МКЭ}}$) [1].

При промышленных плавках ЛБС $\alpha_{\text{МКП}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы компонента А ($A_{\text{ЭНП1}}$) и компонента В ($B_{\text{ЭНП1}}$), свободные атомы компонента А ($A_{\text{АП1}}$) и компонента В ($B_{\text{АП1}}$) [2].

Процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МКП}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [3, 4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\alpha_{\text{СНП}}$) по следующей реакции:



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



Заканчивается процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МКП}}$ по следующей реакции:



При промышленных плавках ЛБС $\alpha_{\text{МКЭ}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы компонента А ($A_{\text{ЭНЭ1}}$) и компонента В ($B_{\text{ЭНЭ1}}$), свободные атомы компонента А ($A_{\text{АЭ1}}$) и компонента В ($B_{\text{АЭ1}}$) [2].

Процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МКЭ}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [3, 4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\alpha_{\text{СНЭ}}$) по следующей реакции:

$$A_{\text{ЭнЭ1}} + A_{\text{аЭ1}} + B_{\text{ЭнЭ1}} + B_{\text{аЭ1}} = \alpha_{\text{снЭ}}. \quad (4)$$

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

$$\alpha_{\text{снЭ}} + A_{\text{аЭ1}} + B_{\text{аЭ1}} = \alpha_{\text{цкЭ}}. \quad (5)$$

Заканчивается процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МКЭ}}$ по следующей реакции:

$$\alpha_{\text{цкЭ}} + \alpha_{\text{снЭ}} + A_{\text{аЭ1}} + B_{\text{аЭ1}} = \alpha_{\text{МКЭ}}. \quad (6)$$

При промышленных плавках ЛБС $\beta_{\text{МКЭ}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы компонента А ($A_{\text{ЭнЭ2}}$) и компонента В ($B_{\text{ЭнЭ2}}$), свободные атомы компонента А ($A_{\text{аЭ2}}$) и компонента В ($B_{\text{аЭ2}}$) [2].

Процесс кристаллизации $\beta_{\text{МКЭ}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [3, 4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\beta_{\text{снЭ}}$) по следующей реакции:

$$A_{\text{ЭнЭ2}} + A_{\text{аЭ2}} + B_{\text{ЭнЭ2}} + B_{\text{аЭ2}} = \beta_{\text{снЭ}}. \quad (7)$$

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

$$\beta_{\text{снЭ}} + A_{\text{аЭ2}} + B_{\text{аЭ2}} = \beta_{\text{цкЭ}}. \quad (8)$$

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

$$\beta_{\text{цкЭ}} + \beta_{\text{снЭ}} + A_{\text{аЭ2}} + B_{\text{аЭ2}} = \beta_{\text{МКЭ}}. \quad (9)$$

При промышленных плавках ЛБС $\beta_{\text{МКП}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы компонента А ($A_{\text{ЭнП2}}$) и компонента В ($B_{\text{ЭнП2}}$), свободные атомы компонента А ($A_{\text{аП2}}$) и компонента В ($B_{\text{аП2}}$) [2].

Процесс кристаллизации $\beta_{\text{МКП}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [3, 4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\beta_{\text{снП}}$) по следующей реакции:

$$A_{\text{ЭнП2}} + A_{\text{аП2}} + B_{\text{ЭнП2}} + B_{\text{аП2}} = \beta_{\text{снП}}. \quad (10)$$

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

$$\beta_{\text{снП}} + A_{\text{аП2}} + B_{\text{аП2}} = \beta_{\text{цкП}}. \quad (11)$$

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

$$\beta_{\text{цкП}} + \beta_{\text{снП}} + A_{\text{аП2}} + B_{\text{аП2}} = \beta_{\text{МКП}}. \quad (12)$$

При перекристаллизации ЛБС происходят эвтектоидные превращения, которые в общем виде можно выразить следующей реакцией:

$$\gamma_{\text{МК}} = \alpha_{\text{МК}} + \beta_{\text{МК}}, \quad (13)$$

где $\gamma_{\text{МК}}$ – микрокристаллы фаз, полученных при кристаллизации расплава эвтектоидного состава; $\alpha_{\text{МК}}$ – микрокристаллы фаз, содержащих больше компонента А; $\beta_{\text{МК}}$ – микрокристаллы фаз, содержащих больше компонента В.

При промышленных плавках ЛБС $\gamma_{\text{МК}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы компонента А ($A_{\text{Эн1}}$) и компонента В ($B_{\text{Эн1}}$), свободные атомы компонента А ($A_{\text{а1}}$) и компонента В ($B_{\text{а1}}$) [2].

Процесс кристаллизации $\gamma_{\text{МК}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [3, 4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\gamma_{\text{сн}}$) по следующей реакции:

$$A_{\text{Эн1}} + A_{\text{а1}} + B_{\text{Эн1}} + B_{\text{а1}} = \gamma_{\text{сн}}. \quad (14)$$

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

$$\gamma_{\text{сн}} + A_{\text{а1}} + B_{\text{а1}} = \gamma_{\text{цк}}. \quad (15)$$

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

$$\gamma_{\text{цк}} + \gamma_{\text{сн}} + A_{a1} + B_{a1} = \gamma_{\text{мк}}. \quad (16)$$

В общем виде микрокристаллы $\gamma_{\text{мк}}$, состоящие из нанокристаллов и свободных атомов, имеют следующую структуру:

$$\gamma_{\text{мк}} = A_{\text{эн2}} + A_{a2} + B_{\text{эн2}} + B_{a2}, \quad (17)$$

где $A_{\text{эн2}}$ и $B_{\text{эн2}}$ – элементарные нанокристаллы компонентов А и В, а A_{a2} и B_{a2} – свободные атомы компонентов А и В микрокристаллов $\gamma_{\text{мк}}$.

При реакции (13) $\gamma_{\text{мк}}$ распадаются согласно (17). Тогда образование $\alpha_{\text{мк}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [5]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\alpha_{\text{сн}}$) по следующей реакции:

$$A_{\text{эн3}} + A_{a3} + B_{\text{эн3}} + B_{a3} = \alpha_{\text{сн}}, \quad (18)$$

где $A_{\text{эн3}}$ и $B_{\text{эн3}}$ – элементарные нанокристаллы компонентов А и В, а A_{a3} и B_{a3} – свободные атомы компонентов А и В при образовании $\alpha_{\text{мк}}$ в результате реакции (13).

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

$$\alpha_{\text{сн}} + A_{a3} + B_{a3} = \alpha_{\text{цк}}. \quad (19)$$

Заканчивается процесс кристаллизации формированием $\alpha_{\text{мк}}$ по следующей реакции:

$$\alpha_{\text{цк}} + \alpha_{\text{сн}} + A_{a3} + B_{a3} = \alpha_{\text{мк}}. \quad (20)$$

Аналогично, формирование $\beta_{\text{мк}}$ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\beta_{\text{сн}}$) по следующей реакции:

$$A_{\text{эн4}} + A_{a4} + B_{\text{эн4}} + B_{a4} = \beta_{\text{сн}}, \quad (21)$$

где $A_{\text{эн4}}$ и $B_{\text{эн4}}$ – элементарные нанокристаллы компонентов А и В, а A_{a4} и B_{a4} – свободные атомы компонентов А и В при образовании $\beta_{\text{мк}}$ в результате реакции (13).

Затем формируются центры кристаллизации ($\beta_{\text{цк}}$) по следующей реакции:

$$\beta_{\text{сн}} + A_{a4} + B_{a4} = \beta_{\text{цк}}. \quad (22)$$

Заканчивается процесс образования $\beta_{\text{мк}}$ по следующей реакции:

$$\beta_{\text{цк}} + \beta_{\text{сн}} + A_{a4} + B_{a4} = \beta_{\text{мк}}. \quad (23)$$

При этом справедливы следующие уравнения:

$$\begin{aligned} A_{\text{эн2}} &= A_{\text{эн3}} + A_{\text{эн4}}, \\ A_{a2} &= A_{a3} + A_{a4}, \\ B_{\text{эн2}} &= B_{\text{эн3}} + B_{\text{эн4}}, \\ B_{a2} &= B_{a3} + B_{a4}. \end{aligned} \quad (24)$$

Заключение

ЛБС в основном являются эвтектическими сплавами. При кристаллизации их структурными составляющими служат первичные и эвтектические микрокристаллы α -фаз и β -фаз.

При промышленных плавках ЛБС микрокристаллы α -фаз и β -фаз распадаются на элементарные нанокристаллы и свободные атомы компонентов А и В ЛБС.

Кристаллизация ЛБС является наноструктурным процессом, при котором образуются структурообразующие нанокристаллы, центры кристаллизации и микрокристаллы α -фаз и β -фаз.

При перекристаллизации ЛБС происходят эвтектоидные превращения, при которых микрокристаллы γ -фаз распадаются на микрокристаллы α -фаз и β -фаз.

При промышленных плавках ЛБС микрокристаллы γ -фаз распадаются на элементарные нанокристаллы и свободные атомы компонентов А и В ЛБС. Из них формируются микрокристаллы α -фаз и β -фаз.

Перекристаллизация ЛБС является наноструктурным процессом, при котором образуются структурообразующие нанокристаллы, центры кристаллизации и микрокристаллы γ -фаз, α -фаз и β -фаз.

Список литературы / References

1. Курдюмов А.В., Белов В.Д., Пикунов М.В. и др. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебное пособие. М.: Издательский Дом МИСиС, 2011. 615 с.
2. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
3. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 13–19.
4. Марукович Е.И., Никитин К.В., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Механизм сохранения структурной информации силуминов в системе «твердое – жидкое – твердое» // Цветные металлы. 2024. № 11. С. 76–81.
5. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Наноструктурные фазовые превращения при эвтектоидных реакциях бинарных сплавов // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 30–32.