



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-19-22>
УДК 621.745.35

Поступила 19.06.2025
Received 19.06.2025

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Е. И. МАРУКОВИЧ, Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь,
г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24.

В. Ю. СТЕЦЕНКО, А. В. СТЕЦЕНКО, г. Могилев, Беларусь. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

Основными структурными элементами расплавов никель-хромовых, никель-алюминиевых, никель-титановых сплавов являются элементарные нанокристаллы никеля, хрома, алюминия, титана и их свободные атомы. Основными кристаллизующимися фазами никелевых сплавов являются микрокристаллы α - и γ -фаз. Процесс кристаллизации никелевых сплавов наноструктурный. Сначала из элементарных нанокристаллов и свободных атомов образуются структурообразующие нанокристаллы. Затем из них формируются центры кристаллизации. Из этих центров, структурообразующих нанокристаллов и свободных атомов образуются микрокристаллы никелевых сплавов.

Ключевые слова. Никелевые сплавы, кристаллизация, нанокристаллы, центры кристаллизации, свободные атомы, расплав.
Для цитирования. Марукович, Е. И. Кристаллизация никелевых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2025. № 3. С. 19–22. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-19-22>.

CRYSTALLIZATION OF NICKEL ALLOYS

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

The main structural elements of melts of nickel-chromium, nickel-aluminum, nickel-titanium alloys are elementary nanocrystals of nickel, chromium, aluminum, titanium and their free atoms. The main crystallizing phases of nickel alloys are α -phase and γ -phase microcrystals. The crystallization process of nickel alloys is nanostructured. First, structure-forming nanocrystals are formed from elementary nanocrystals and free atoms. Then crystallization centers are formed from them. From these centers, structure-forming nanocrystals and free atoms, microcrystals of nickel alloys are formed.

Keywords. Nickel alloys, crystallization, nanocrystals, crystallization centers, free atoms, melt.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Crystallization of nickel alloys. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 3, pp. 19–22. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-19-22>.

Среди никелевых сплавов наибольшее промышленное применение получили никель-хромовые сплавы (НХС), никель-алюминиевые сплавы (НАС) и никель-титановые сплавы (НТС) [1].

Основными структурными составляющими при кристаллизации промышленных НХС являются первичные микрокристаллы γ -фазы ($\gamma_{\text{МК1}}$); эвтектика, состоящая из микрокристаллов γ -фазы ($\gamma_{\text{МК2}}$) и α -фазы ($\alpha_{\text{МК1}}$); первичные микрокристаллы α -фазы ($\alpha_{\text{МК2}}$) [1].

Основными элементами, влияющими на кристаллизацию НХС, являются никель и хром. НХС можно получить, растворив в жидком никеле хром.

Теплота плавления никеля составляет 17,5 кДж/моль, а теплота его атомизации – 424,5 кДж/моль [2]. Поэтому при плавлении никеля атомизируются только 4,1 % его ионов, а микрокристаллы никеля распадаются на его элементарные нанокристаллы [3].

Теплота плавления хрома составляет 13,8 кДж/моль, а теплота его атомизации – 397,2 кДж/моль [2]. Поэтому при плавлении (растворении в жидком никеле) хрома атомизируются только 3,5 % его ионов, а микрокристаллы хрома распадаются на его элементарные нанокристаллы [3].

Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки НХС $\gamma_{\text{МК1}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы никеля ($\text{Ni}_{\text{ЭН1}}$) и хрома ($\text{Cr}_{\text{ЭН1}}$), свободные атомы никеля ($\text{Ni}_{\text{а1}}$) и хрома ($\text{Cr}_{\text{а1}}$) [3].

Процесс кристаллизации $\gamma_{\text{МК1}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\gamma_{\text{СН1}}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации ($\gamma_{\text{цк1}}$):

$$\gamma_{\text{сн1}} + \text{Ni}_{\text{a1}} + \text{Cr}_{\text{a1}} = \gamma_{\text{цк1}}. \quad (2)$$

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

$$\gamma_{\text{цк1}} + \gamma_{\text{сн1}} + \text{Ni}_{\text{a1}} + \text{Cr}_{\text{a1}} = \gamma_{\text{МК1}}. \quad (3)$$

Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки НХС $\gamma_{\text{МК2}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы никеля ($\text{Ni}_{\text{эН2}}$) и хрома ($\text{Cr}_{\text{эН2}}$), свободные атомы никеля (Ni_{a2}) и хрома (Cr_{a2}) [3].

Процесс кристаллизации $\gamma_{\text{МК2}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\gamma_{\text{сн2}}$) по реакции:

$$\text{Ni}_{\text{эН2}} + \text{Ni}_{\text{a2}} + \text{Cr}_{\text{эН2}} + \text{Cr}_{\text{a2}} = \gamma_{\text{сн2}}. \quad (4)$$

Затем образуются центры кристаллизации ($\gamma_{\text{цк2}}$):

$$\gamma_{\text{сн2}} + \text{Ni}_{\text{a2}} + \text{Cr}_{\text{a2}} = \gamma_{\text{цк2}}. \quad (5)$$

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

$$\gamma_{\text{цк2}} + \gamma_{\text{сн2}} + \text{Ni}_{\text{a2}} + \text{Cr}_{\text{a2}} = \gamma_{\text{МК2}}. \quad (6)$$

Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки НХС $\alpha_{\text{МК1}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы никеля ($\text{Ni}_{\text{эН3}}$) и хрома ($\text{Cr}_{\text{эН3}}$), свободные атомы никеля (Ni_{a3}) и хрома (Cr_{a3}) [3].

Процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МК1}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\alpha_{\text{сн1}}$) по реакции:

$$\text{Ni}_{\text{эН3}} + \text{Ni}_{\text{a3}} + \text{Cr}_{\text{эН3}} + \text{Cr}_{\text{a3}} = \alpha_{\text{сн1}}. \quad (7)$$

Затем образуются центры кристаллизации ($\alpha_{\text{цк1}}$):

$$\alpha_{\text{сн1}} + \text{Ni}_{\text{a3}} + \text{Cr}_{\text{a3}} = \alpha_{\text{цк1}}. \quad (8)$$

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

$$\alpha_{\text{цк1}} + \alpha_{\text{сн1}} + \text{Ni}_{\text{a3}} + \text{Cr}_{\text{a3}} = \alpha_{\text{МК1}}. \quad (9)$$

Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки НХС $\alpha_{\text{МК2}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы никеля ($\text{Ni}_{\text{эН4}}$) и хрома ($\text{Cr}_{\text{эН4}}$), свободные атомы никеля (Ni_{a4}) и хрома (Cr_{a4}) [3].

Процесс кристаллизации $\alpha_{\text{МК2}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\alpha_{\text{сн2}}$) по реакции:

$$\text{Ni}_{\text{эН4}} + \text{Ni}_{\text{a4}} + \text{Cr}_{\text{эН4}} + \text{Cr}_{\text{a4}} = \alpha_{\text{сн2}}. \quad (10)$$

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

$$\alpha_{\text{сн2}} + \text{Ni}_{\text{a4}} + \text{Cr}_{\text{a4}} = \alpha_{\text{цк2}}. \quad (11)$$

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

$$\alpha_{\text{цк2}} + \alpha_{\text{сн2}} + \text{Ni}_{\text{a4}} + \text{Cr}_{\text{a4}} = \alpha_{\text{МК2}}. \quad (12)$$

На кристаллизацию $\gamma_{\text{МК1}}$ НХС большое влияние будут оказывать атомы водорода и кислорода. Атомарный водород образуется при взаимодействии паров воды атмосферного воздуха с элементарными нанокристаллами никеля расплавов НХС [4]. Атомы водорода адсорбируются элементарными нанокристаллами никеля, поскольку стандартная теплота адсорбции атомарного водорода на никеле составляет 141 кДж/моль [5]. При этом в расплавах НХС не образуется гидрид никеля [6].

Атомарный водород находится в расплавах НХС в адсорбированном и свободном (растворенном) состояниях. Между адсорбированным водородом $\{\text{H}\}$ и растворенным в расплавах НХС устанавливается равновесие по закону Генри согласно следующему уравнению [7]:

$$\{\text{H}\} = k_1 [\text{H}], \quad (13)$$

где k_1 – константа Генри.

Атомарный кислород образуется при взаимодействии атмосферных молекул кислорода с элементарными нанокристаллами никеля расплавов НХС [4]. Атомы кислорода адсорбируются элементарными

нанокристаллами никеля, поскольку стандартная теплота адсорбции атомарного кислорода на никеле составляет 462 кДж/моль [5]. Эта величина превышает стандартную теплоту образования NiO [8].

Атомарный кислород находится в расплавах НХС в адсорбированном и свободном (растворенном) состояниях. Между адсорбированным кислородом $\{O\}$ и растворенным в расплавах НХС устанавливается равновесие по закону Генри согласно следующему уравнению [7]:

$$\{O\} = k_2 [O], \quad (14)$$

где k_2 – константа Генри.

В НХС содержится достаточное количество нанокристаллов и атомов хрома, которые являются хорошими растворителями. Они снижают в расплавах НХС концентрацию растворенного кислорода, что, согласно уравнению (14), уменьшает концентрацию адсорбированного кислорода. Это снижает поверхностную активность атомов кислорода на элементарных нанокристаллах никеля и делает ее сравнимой с поверхностной активностью атомов водорода в расплавах НХС.

Атомы водорода и кислорода, адсорбируясь на элементарных нанокристаллах никеля, препятствуют образованию $\gamma_{\text{нк1}}$ при кристаллизации НХС, что приводит к укрупнению зерен в отливках. Для модифицирования первичной структуры НХС необходимо уменьшить в их расплавах концентрацию адсорбированных атомов кислорода и водорода.

Модифицирующие элементы являются активными раскислителями и гидридообразователями [5, 8]. В расплавах НХС они не образуют гидридов [6]. Но продукты модифицирования, в основном оксиды, являются активными адсорбентами растворенного водорода, снижающими его концентрацию и, согласно уравнению (13), уменьшающими концентрацию адсорбированного водорода.

Основными структурными составляющими при кристаллизации промышленных НАС являются первичные микрокристаллы γ -фазы ($\gamma_{\text{МК3}}$) [1].

Основными элементами, влияющими на кристаллизацию НАС, являются никель и алюминий. НАС можно получить, растворив в жидком никеле алюминий.

Теплота плавления алюминия составляет 10,8 кДж/моль, а теплота его атомизации равна 325,1 кДж/моль [2]. Поэтому при плавлении (растворении в жидком никеле) алюминия атомизируются только 3,3 % его ионов, а микрокристаллы алюминия распадаются на его элементарные нанокристаллы [3].

Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки НАС $\gamma_{\text{МК3}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы никеля ($\text{Ni}_{\text{ЭН5}}$) и алюминия ($\text{Al}_{\text{ЭН}}$), свободные атомы никеля ($\text{Ni}_{\text{а5}}$) и алюминия ($\text{Al}_{\text{а}}$) [3].

Процесс кристаллизации $\gamma_{\text{МК3}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\gamma_{\text{СН3}}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации ($\gamma_{\text{НК3}}$):



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



Основными структурными составляющими при кристаллизации промышленных НТС являются первичные микрокристаллы γ -фазы ($\gamma_{\text{МК4}}$) [1].

Основными элементами, влияющими на кристаллизацию НТС, являются никель и титан. НТС можно получить, растворив в жидком никеле титан.

Теплота плавления титана составляет 17,2 кДж/моль, а теплота его атомизации – 471,8 кДж/моль [2]. Поэтому при плавлении (растворении в жидком никеле) титана атомизируются только 3,7 % его ионов, а микрокристаллы титана распадаются на его элементарные нанокристаллы [3].

Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, в условиях промышленной плавки НТС $\gamma_{\text{МК4}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы никеля ($\text{Ni}_{\text{ЭН6}}$) и титана ($\text{Ti}_{\text{ЭН}}$), свободные атомы никеля ($\text{Ni}_{\text{а6}}$) и титана ($\text{Ti}_{\text{а}}$) [3].

Процесс кристаллизации $\gamma_{\text{МК4}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\gamma_{\text{СН4}}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации ($\gamma_{\text{цк4}}$):

$$\gamma_{\text{сн4}} + \text{Ni}_{\text{a6}} + \text{Ti}_{\text{a}} = \gamma_{\text{цк4}}. \quad (19)$$

Заканчивается процесс кристаллизации $\gamma_{\text{мк4}}$ реакцией:

$$\gamma_{\text{цк4}} + \gamma_{\text{сн4}} + \text{Ni}_{\text{a6}} + \text{Ti}_{\text{a}} = \gamma_{\text{мк4}}. \quad (20)$$

Таким образом, кристаллизация никелевых сплавов является наноструктурным процессом, в котором основную роль играют элементарные нанокристаллы хрома, никеля, алюминия, титана и структурообразующие нанокристаллы α - и γ -фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник для вузов / А. В. Курдюмов [и др.]. – М.: Изд. дом МИСиС, 2011. – 615 с.
2. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ. – М.: Metallurgia, 1976. – 600 с.
3. **Марукович, Е. И.** Наноструктурная теория металлических расплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 7–9.
4. Кристаллизация металлов и сплавов: моногр. / Е. И. Марукович [и др.]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2025. – 192 с.
5. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / под ред. Б. А. Колачева, Ю. В. Левинского. – М.: Metallurgia, 1987. – 368 с.
6. **Антонова, М. М.** Свойства гидридов металлов: справ. / М. М. Антонова. – Киев: Наукова думка, 1975. – 128 с.
7. **Жуховицкий, А. А.** Физическая химия / А. А. Жуховицкий, Л. А. Шварцман. – М.: Metallurgia, 2001. – 688 с.
8. Физико-химические свойства окислов: справ. / под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Metallurgia, 1978. – 472 с.

REFERENCES

1. **Kurdyumov A. V.** [et al.] *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnykh metallov: uchebnik dlya vuzov* [Production of castings from non-ferrous metal alloys: textbook for universities]. Moscow, Izd. dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
2. *Svoystva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svoystva: sprav.* [Properties of elements. Part 1. Physical properties: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 600 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. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Nikitin K. V., Stetsenko A. V.** *Kristallizatsiya metallov i splavov: monogr.* [Crystallization of metals and alloys: monograph]. Samara: Samar. state technical un-ty Publ., 2025, 192 p.
5. **Kolachev B. A., Levinsky Yu. V.** (ed.) *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami: sprav.* [Constants of interaction of metals with gases: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
6. **Antonova M. M.** *Svoystva gidridov metallov: sprav.* [Properties of metal hydrides: reference book]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 128 p.
7. **Zhuhovickij A. A., Shvarcman L. A.** *Fizicheskaya himiya* [Physical Chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2001, 688 p.
8. **Samsonov G. V.** (ed.) *Fiziko-himicheskie svoystva okislov: sprav.* [Physicochemical properties of oxides: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.