

*Т. Н. Вершинина, Н. Ю. Самойлова, С. В. Сумников, А. М. Балагуров*

## Сравнительные исследования структурных и фазовых превращений в Fe–(31–35) ат. % Ga, проведенные с использованием *in situ* нейтронной дифракции

Интерес к Fe–Ga сплавам возник после открытия в них эффекта гигантской магнитострикции в начале 2000-х гг. Сейчас хорошо известно, что для системы Fe–Ga характерно наличие двух пиковых значений магнитострикции, соответствующих 19–20 и 27–29 ат. % Ga, с глубоким провалом между этими областями и довольно резким спадом при содержании галлия более 30 ат. %. С точки зрения перспективы практического использования сплавов Fe–Ga наибольший интерес представляет область с относительно малым содержанием галлия (менее 30 ат. %), соответственно, основные усилия были направлены на ее изучение, в то время как сплавы с большим содержанием Ga несколько выпали из поля зрения. Тем не менее в их изучении есть необходимость, так как при высоких концентрациях галлия возможно выделе-

ние метастабильной фазы  $Fe_{13}Ga_9$ , которая, согласно теоретическим оценкам, может наблюдаться в этих сплавах при понижении концентрации Ga вплоть до 25 ат. %. Ее формирование может влиять на поведение константы магнитострикции (быстрое уменьшение при содержании галлия более 30 ат. %).

В ЛНФ на реакторе ИБР-2 выполнена серия дифракционных экспериментов, целью которых было определение того, в каких диапазонах концентраций и при каких условиях в принципе возможно выделение фазы  $Fe_{13}Ga_9$ . На дифрактометре ФДВР (рис. 1) были проведены сравнительные исследования эволюции фазового состава сплавов Fe–(31–35) ат. % Ga в *as cast* состоянии при непрерывном нагреве до 850 °C и последующем охлаждении. Было обнаружено, что фазовые превращения в этих метастабильных сплавах

*T. N. Vershinina, N. Yu. Samoylova, S. V. Sumnikov, A. M. Balagurov*

## Comparative Study of Structures and Phase Transitions in Fe–(31–35) at. % Ga Alloys by *In Situ* Neutron Diffraction

Interest in Fe–Ga alloys arose after the discovery of the giant magnetostriction effect in them in the early 2000s. It is now well known that the Fe–Ga system is characterized by the presence of two peaks of magnetostriction corresponding to 19–20 and 27–29 at. % Ga. A minimum is observed between these regions, and at a gallium content of > 30 at. %, the magnetostriction decreases quite sharply. From the point of view of the practical use of Fe–Ga alloys, the region with a relatively low content of gallium (< 30 at. %) is of the greatest interest. Accordingly, the main efforts were directed to its study, while alloys with a high Ga content fell out of sight. Nevertheless, there is a need to study them, since at high concentrations of gallium, the precipitation of the metastable  $Fe_{13}Ga_9$  phase is possible. According to theoretical estimates, this phase

can be observed in Fe–Ga alloys with a decrease in the Ga concentration down to 25 at. %. Its formation can affect the behavior of the magnetostriction constant (rapid decrease at a gallium content of > 30 at. %). A series of diffraction experiments were carried out at the IBR-2 reactor at FLNP JINR, the purpose of which was to determine concentration ranges and conditions at which  $Fe_{13}Ga_9$  phases can be observed.

Comparative studies of the evolution of the phase composition of Fe–(31–35) at. % Ga alloys in the *as cast* state were carried out on the HRFD diffractometer (Fig. 1) during continuous heating to 850 °C and subsequent cooling. Phase transformations in these metastable alloys proceed in a similar way and consist of several stages characterized by a certain set of features (example in Fig. 2).

протекают похожим образом и состоят из нескольких стадий, характеризующихся определенным набором признаков (пример на рис. 2).

Обнаружено, что в сплавах с большими концентрациями галлия (32–35 ат. %) фаза  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$  имеется в исходном *as cast* состоянии и область ее существования ограничивается максимальной температурой  $\sim 570^\circ\text{C}$ . Интересен тот факт, что для того, чтобы произошел переход  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_6\text{Ga}_5$ , необходимо предваритель-

ное уменьшение содержания железа в  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$ . Именно по этой причине это фазовое превращение происходит после предварительного выделения богатой железом фазы  $\text{L}_{12}$ . При охлаждении сплавов с 32–35 ат. % Ga фаза  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$  не образуется. При уменьшении содержания галлия до 31 ат. % в *as cast* состоянии  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$  отсутствует, но выделяется в процессе нагрева при  $\sim 425^\circ\text{C}$  и существует, как и в других сплавах, вплоть до  $570^\circ\text{C}$ . В отличие от сплавов с большей

Рис. 1. Схема (слева) и фото (справа) дифрактометра ФДВР

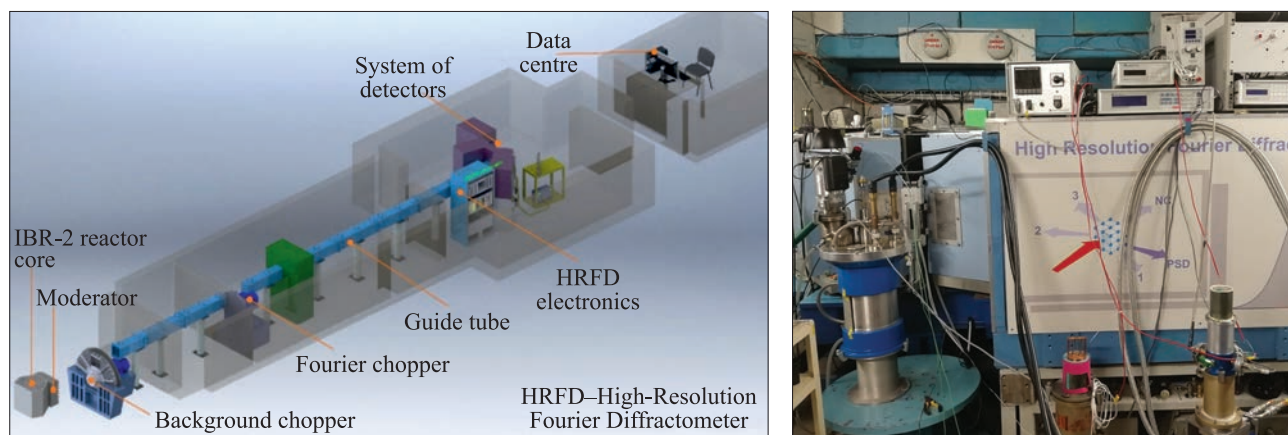


Fig. 1. Schematics (left) and photo (right) of the HRFD diffractometer

Рис. 2. Эволюция фазового состава сплавов Fe–31 ат. % Ga в процессе нагрева и последующего охлаждения

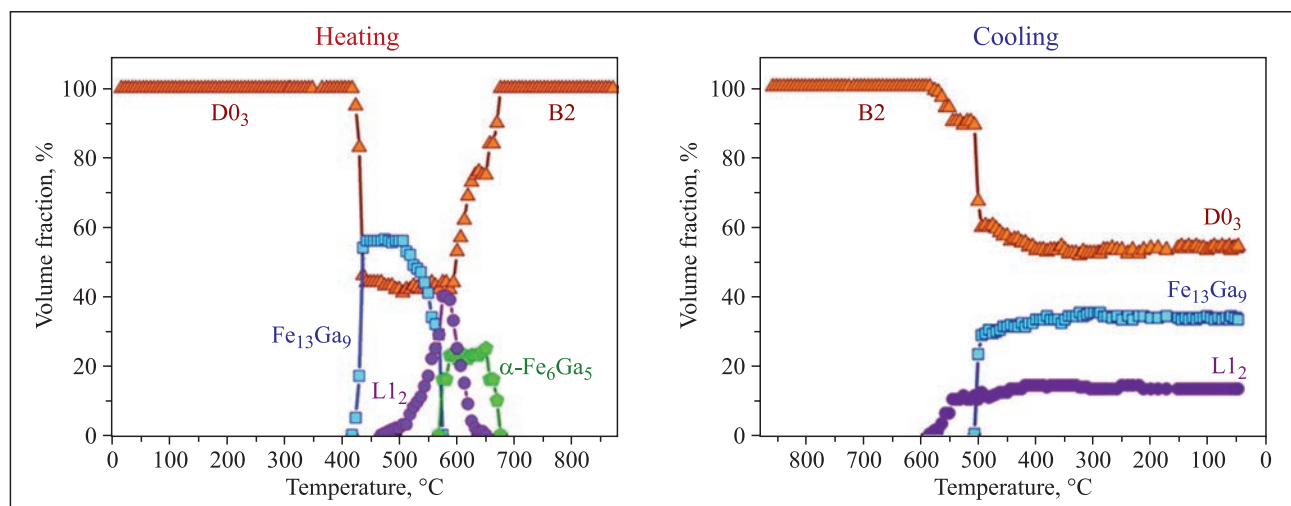


Fig. 2. The evolution of the phase composition of Fe–31 at. % Ga alloys during heating and subsequent cooling

It was found that the  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$  phase is present in the initial *as cast* state of alloys with high gallium concentrations of 32–35 at. % and its existence region is limited by a maximum temperature of  $\sim 570^\circ\text{C}$ . An interesting fact is that a preliminary decrease in the iron content in  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$  is necessary for  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_6\text{Ga}_5$  transition to occur. Therefore, this phase transformation occurs after prelim-

inary precipitation of the iron-rich  $\text{L}_{12}$  phase.  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$  is not detected during further cooling.  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$  is absent in the *as cast* state when the gallium content decreases to 31 at. %, but it precipitates during heating at  $\sim 425^\circ\text{C}$  and is present up to  $570^\circ\text{C}$ , as in other alloys. In contrast to alloys with higher Ga concentration, intermetallic  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$  precipitates in the Fe–31 at. % Ga alloy during cooling at

концентрацией в сплаве Fe–31 ат. % Ga интерметаллид  $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$  выделяется в процессе охлаждения при  $\sim 510^\circ\text{C}$ , предотвращая выделение  $\alpha\text{-Fe}_6\text{Ga}_5$ .

Статья об исследованиях «Comparative Study of Structures and Phase Transitions in Fe–(31–35)Ga Alloys by *In Situ* Neutron Diffraction» авторов Т.Н.Вершининой, Н.Ю.Самойловой, С.В.Сумникова, А.М.Балагурова, В.В.Палачевой, И.С.Головина была опубликована в 2023 г. в Journal of Alloys and Compounds (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167967>).

---

$\sim 510^\circ\text{C}$ , thus preventing the appearance of another monoclinic phase,  $\alpha\text{-Fe}_6\text{Ga}_5$ .

In 2023, the Journal of Alloys and Compounds published an article about the research “Comparative Study of Structures and Phase Transitions in Fe–(31–35)Ga Alloys by *In Situ* Neutron Diffraction” authored by T.N. Vershinina, N. Yu. Samoylova, S. V. Sumnikov, A. M. Balagurov, V. V. Palacheva, I. S. Golovin (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167967>).