

**Александр Евгеньевич Устинов<sup>1,2\*</sup>, Валентин Юрьевич Ярков<sup>1,2</sup>, Валерий Леонидович Панченко<sup>1</sup> Светлана Владимировна Соловьева<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Акционерное Общество Институт Реакторных Материалов, г. Заречный, Россия

<sup>2</sup>Уральский Федеральный Университет имени первого Президента Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

\**sanya.ustinow@yandex.ru*,

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ СТАЛИ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА

Методом сканирующей электронной микроскопии были исследованы образцы из стали ферритно-мартенситного класса, нагретые в печи до температуры 1000 °С и охлажденные при различных скоростях. Охлаждение производилось в воду, на воздухе и в печи. Методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и дифракции отраженных электронов (EBSD) определялись характеристики структурных составляющих.

*Ключевые слова:* Ферритно-мартенситная нержавеющая сталь, мартенсит, феррит, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), дифракция отраженных электронов (EBSD).

**Alexander E. Ustinov<sup>1,2</sup>, Valentin Yu. Yarkov<sup>1,2</sup>, Valery L. Panchenko<sup>1</sup>, S. V. Solovyova<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> JSC "Institute of Reactor Materials", Zarechny, Russia

<sup>2</sup> "Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin", Yekaterinburg, Russia

## INFLUENCE OF COOLING RATE ON THE STRUCTURE OF FERRITE- MARTENSITE CLASS STEEL

Using scanning electron microscopy, ferritic-martensitic steel samples heated in a furnace to a temperature of 1000 °C and cooled at different speeds were studied. Cooling was carried out in water, in air and in an oven. The characteristics of the structural components were determined using scanning electron microscopy (SEM) and electron backscatter diffraction (EBSD).

*Key words:* Ferritic-martensitic stainless steel, martensite, ferrite, scanning electron microscopy (SEM), Electron backscatter diffraction (EBSD).

Для развития атомной промышленности в России необходимо создание современных ядерных реакторов с применением материалов, обладающих оптимальными свойствами для работы в условиях повышенных температур, коррозионно-активных сред, длительного действия нейтронного облучения. Одним из перспективных материалов является сталь Х12НМВБФСР, которая обладает высокой коррозионной стойкостью, незначительным радиационным распуханием. Наличие повышенной ползучести в сталях ферритно-мартенситного класса при высоких рабочих температурах является наиболее

важной проблемой, ограничивающих их применение. Решением проблемы ползучести может стать возможность понимания процессов протеканий фазовых превращений и их влияние на получение необходимого структурного состояния материала. [1, 2, 3].

Структура стали, определяющая свойства стали в первую очередь определяется параметрами термической обработки – главным образом скоростью охлаждения. Данная работа посвящена анализу влияния скорости охлаждения на фазовые и структурные составляющие стали X12HMBBFSP.

Исследования проводились на образцах из стали ферритно-мартенситного класса, после трех различных термических обработок. Образцы нагревали до температуры 1000 °С, выдерживали около 5 минут и охлаждали при ~500 °С/с (закалка в воду), ~25 °С/с (нормализация) и 0,017 °С/с (отжиг, с заданной скоростью охлаждения).

Исследования были выполнены на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 FEG-SEM, оснащенный детекторами вторичных и отраженных электронов [4].

Проведенное исследование стали X12HMBBFSP в исходном состоянии показало (рис. 1 а, б), что ее структура состоит из мартенсита, остаточного феррита, крупных карбидов на основе Nb (рис. 1 а, округлые светлые частицы, как по границам, так и в теле зерен) [5].

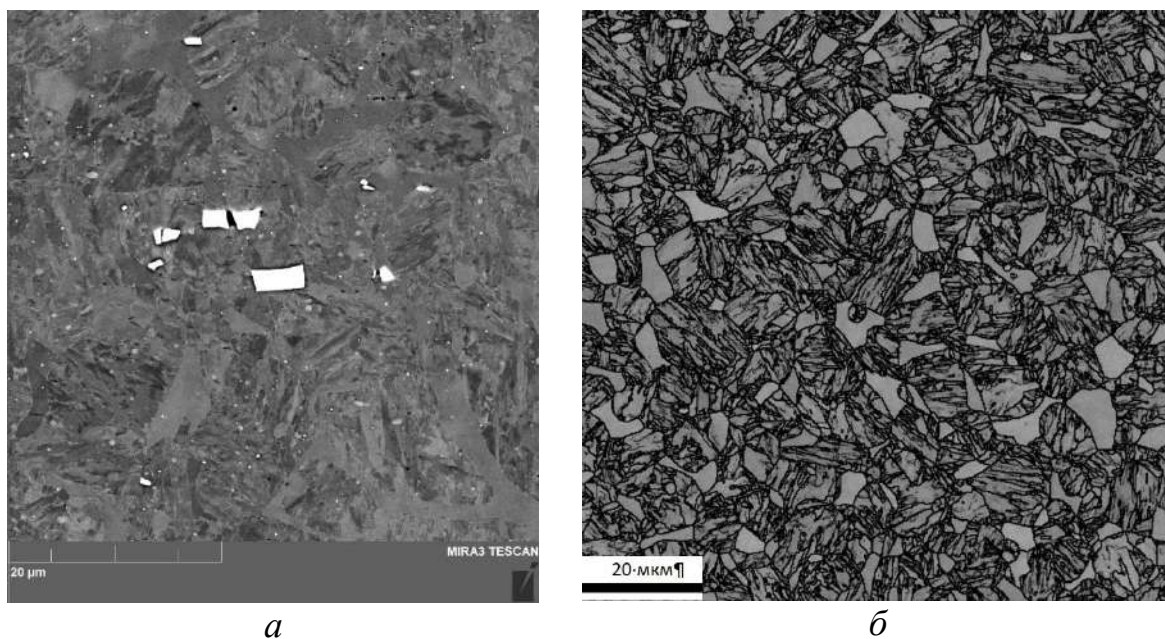
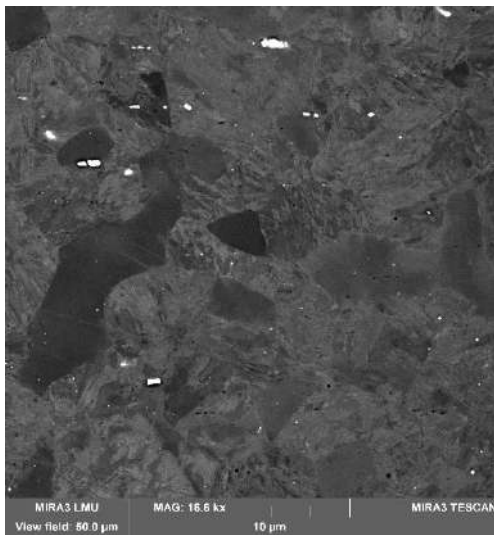
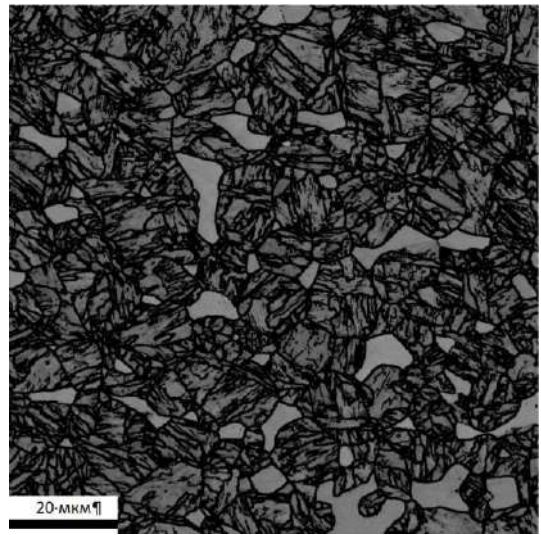


Рис. 1. Структура стали X12HMBBFSP исходное состояние: *а* – сканирующая электронная микроскопия (СЭМ); *б* – дифракция отраженных электронов (EBSD)

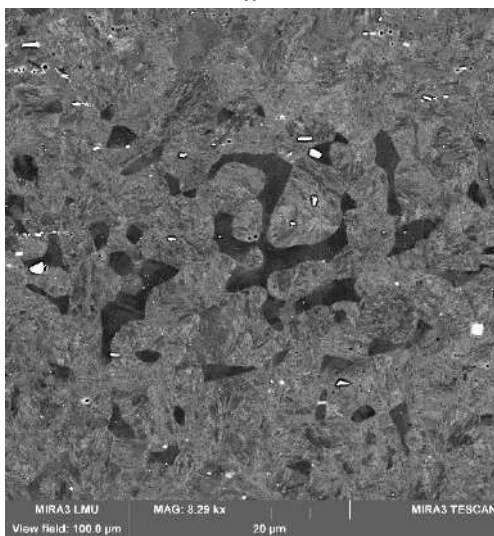
На картинах дифракции обратнорассеянных электронов, в отличие от результатов сканирующей электронной микроскопии в отраженных электронах, наблюдается четкое разделение по морфологическим признакам между ферритом, имевшемся в стали при высокой температуре ( $\delta$ -феррит), и мартенситом, образовавшемся при распаде аустенита (рис. 1 б, рис. 2 б, г, е).



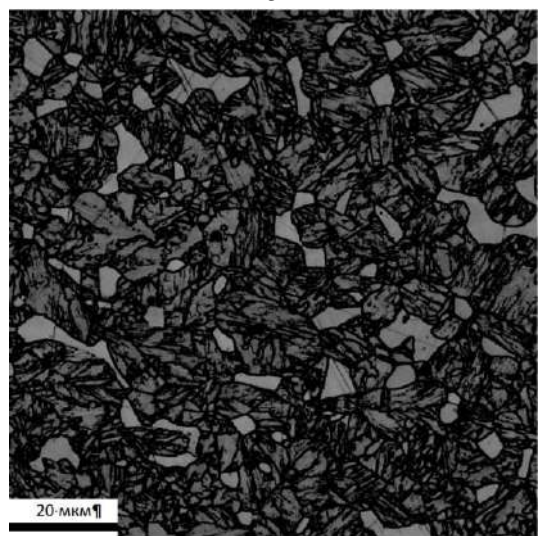
*a*



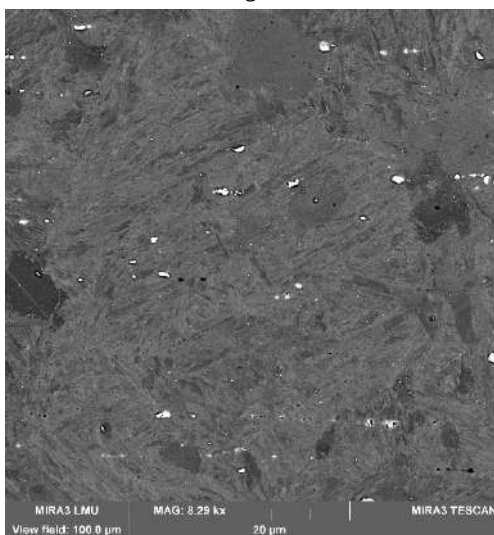
*б*



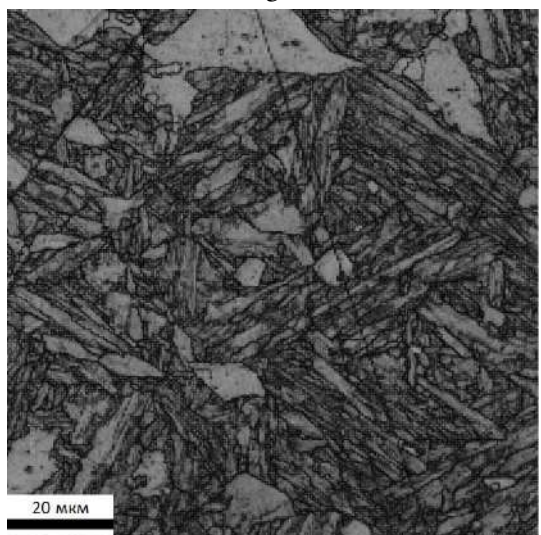
*в*



*г*



*д*



*е*

Рис. 2. Структура стали X12NMВБФСР при различных скоростях охлаждения СЭМ (*a, в, д*), EBSD (*б, г, е*): *a, б* – после закалки в воду; *в, г* – после охлаждения на воздухе; *д, е* – после охлаждения в печи



После трех различных термических обработок (заковки (рис. 2 а, б), нормализации (рис. 2 в, г) и отжиге (рис. 2 д, е)) наблюдается схожая структура с исходным состоянием (рис. 1 а, б). Охлаждение с медленной скоростью привело как к увеличению размеров областей  $\delta$ -феррита, так и размеров зерен аустенита, за счет достаточного продолжительного пребывания образца в области высоких температур. Следствием последнего является увеличение размеров мартенситных пластин.

Выводы:

Показана возможность использования ориентационной микроскопии для идентификации структурных составляющих в феррито-мартенситных сталях. Относительно исходного состояния, структура стали X12НМВБФСР сохраняется после проведения термических обработок. Однако, охлаждении в печи приводит к увеличению размеров структурных составляющих – феррита и ламелей мартенсита.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ioltukhovskiy A. G. Heat resistant reduced activation 12% Cr steel of 16Cr12W2VTaB type-advanced structural material for fusion and fast breeder power reactors / A. G. Ioltukhovskiy [et al.] // Journal of Nuclear Materials. 2002. V.307–311. P. 532–535. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(02\)01087-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)01087-5).
2. Klueh R. L. Reduced-activation steels: Future development for improved creep strength / R. L. Klueh // Journal of Nuclear Materials. 2008. V. 378. P. 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.05.010>.
3. Конструкционные материалы ядерных реакторов: учебное пособие для вузов / Н. М. Бескоровайный [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1995. 704 с.
4. Pastukhov V. I. Effect of Grain Boundaries Type on Carbides Precipitates in Tempered Martensite / V. I. Pastukhov [et. al.] // Materials Science Forum. 2019. V. 946. P. 368–373. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.368>.
5. Полехина Н. А. Сравнительное исследование микроструктуры, механических свойств и особенностей разрушения жаропрочных ферритно-мартенситных сталей ЭК-181, ЧС-139 и ЭП-823 в интервале температуры от -196 до 720 °С / Н. А. Полехина [и др.] // ВАНТ. 2018 № 4. С. 38–47. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2018-41-4-38-47>.

#### REFERENCES

1. Ioltukhovskiy A. G. Heat resistant reduced activation 12% Cr steel of 16Cr12W2VTaB type-advanced structural material for fusion and fast breeder power reactors / A. G. Ioltukhovskiy [et al.] // Journal of Nuclear Materials. 2002. V.307–311. P. 532–535. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(02\)01087-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)01087-5).
2. Klueh R. L. Reduced-activation steels: Future development for improved creep strength / R. L. Klueh // Journal of Nuclear Materials. 2008. V. 378. P. 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.05.010>.
3. Structural materials of nuclear reactors: a textbook for universities / N. M. Beskorovainy [et al.]. M.: Energoatomizdat, 1995. P. 704.

4. Pastukhov V. I. Effect of Grain Boundaries Type on Carbides Precipitates in Tempered Martensite / V. I. Pastukhov [et. al.] // Materials Science Forum. 2019. V. 946. P. 368–373.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.368>.
5. Polekhina N. A. Comparative investigation of microstructure, mechanical properties and fracture features of heat-resistant ferritic-martencitic steels EK-181, ChS-139 and EP-823 in the temperature range from –196 ro 720 °C / N. A. Polekhina [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. 2018 V. 4. P. 38–47. [https://doi.org/ 10.21517/0202-3822-2018-41-4-38-47](https://doi.org/10.21517/0202-3822-2018-41-4-38-47).