

**Светлана Владимировна Соловьева^{1,2*}, Владимир Иванович Пастухов¹,
Валентин Юрьевич Ярков¹, Александр Евгеньевич Устинов¹**

¹АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

**Ssoloveva00@gmail.com*

Научный руководитель – профессор, доктор техн. наук М. Л. Лобанов

ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА

Методами сканирующей электронной микроскопии, включая микрозондовый рентгеноспектральный анализ, установлены структурно-фазовые изменения в нержавеющей стали ферритно-мартенситного класса после термических обработок с различными скоростями охлаждения. В зависимости от скорости охлаждения происходит изменение доли структурных составляющих и перераспределения основных легирующих элементов (Cr, Mo и Mn). Наличие локальных неоднородностей в элементном составе приводит к изменению фазового состава, а именно, к выделению вторых фаз, включающих в себя карбиды на основе Cr и Mo в форме «сеток» по границам ферритных зерен.

Ключевые слова: микроструктура, нержавеющая сталь, сканирующая электронная микроскопия, фазовые превращения, мартенсит, δ -феррит, бейнит.

***Svetlana V. Solovyova^{1,2}, Vladimir I. Pastukhov¹, Valentin Yu. Yarkov¹,
Alexander E. Ustinov¹***

¹ JSC "Institute of Reactor Materials", Zarechny, Russia

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

PECULIARITIES OF PHASE TRANSFORMATIONS IN FERRITIC- MARTENSITIC STAINLESS STEEL

The methods of scanning electron microscopy, including microprobe X-ray spectral analysis, have established structural and phase changes in stainless steel of ferrite-martensitic class after heat treatment with different cooling rates. Depending on the cooling rate, there is a change in the proportion of structural components and redistribution of the main alloying elements (Cr, Mo and Mn). The presence of local inhomogeneities in the elemental composition leads to a change in the phase composition, namely, to the separation of second phases, including carbides based on Cr and Mo in the form of "meshes" along the boundaries of ferrite grains.

Key words: microstructure, stainless steel, scanning electron microscopy, phase transformations, martensite, δ -ferrite, bainite

До настоящего времени происходит развитие нержавеющей хромистых сталей, вызванное необходимостью создания материалов с повышенными физико-механическими свойствами и высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах [1]. Возможность включения в состав сталей системы Fe-Cr дополнительных легирующих элементов для достижения заданного уровня физико-механических и коррозионных свойств предопределило их широкий спектр применения. Стали, содержащие более 12 масс. % Cr, становятся более коррозионными стойкими за счет образования плотной оксидной пленки на основе Cr [2, 3]. Важным является легирование стали Mo, как элементом, повышающим жаропрочность, находясь в твердом растворе. Также Mo значительно повышает устойчивость сталей к коррозии в морской воде и кислотах [1].

Наибольший интерес в промышленности вызывают нержавеющей стали ферритно-мартенситного и мартенситного класса за счет высоких показателей механических и коррозионных свойств. Однако, существует ряд проблем, связанных со структурно-фазовым состоянием данных сталей, включая неоднородность распределения легирующих элементов [3, 4].

Данная работа посвящена изучению особенностей фазовых превращений в нержавеющей стали X12M1БФР после охлаждения с различными скоростями из высокотемпературной области.

В качестве материала исследования использовалась нержавеющей сталь ферритно-мартенситного класса X12M1БФР. Химический состав стали приведен в таблице 2.1.

Таблица 1

Химический состав стали X12M1БФР по ТУ 14-131-979-200, масс. %

Fe	Cr	V	Ni	Nb	Mo
82,0...87,3	11,0...13,0	0,1...0,3	0,1...0,3	0,3...0,6	1,2...1,8

Термическая обработка заключалась в нагреве двух партий образцов в печи с воздушной атмосферой до температуры 1050 °С, выдержкой в течение 10 минут и в последующем охлаждении с различными скоростями (охлаждение в воде и в печи).

Электронно-микроскопические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Mira 3LMU и Helios 5CX, оснащенных системами энерго-дисперсионного анализа характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) x-Act 6 и Ultim Max фирмы Oxford Instruments при ускоряющих напряжениях 20кВ.

В исходной структуре стали, рисунок 1 а-б, наблюдаются зерна феррита неправильной формы, пакеты мартенсита, частицы вторых фаз в зернах феррита, а также включения карбидных фаз, рисунок 2 а-г. Результаты ЭДС анализа показывают неоднородность распределения Cr и Mo. Наблюдается их

повышенное содержание в областях ферритных зерен. Состав и технология изготовления исходного материала привели к выпадению высокотемпературных карбидных фаз на основе Nb и Mo округлой формы. В теле зерен феррита и по границам ламелей мартенсита выявлено наличие мелкодисперсных фаз, вероятно, выделившихся в процессе термических обработок при изготовлении изделия, рисунок 1 б.

Структурное состояние образца стали после быстрого охлаждения (в воде) из высокотемпературной области имеет общие черты с исходным образцом, рисунок 1 в-г. Однако, нагрев в область высоких температур и последующее быстрое охлаждение, по всей видимости, приводит к растворению мелкодисперсных частиц вторых фаз. По данным ЭДС анализа можно сказать о неравномерном распределении Cr и Mo между ферритом и мартенситом.

Кардинально отличается структурно-фазовое состояние стали после охлаждения в печи. Медленное охлаждение, по всей видимости, приводит к образованию феррита, как основного структурного элемента, рисунок 1 д. Наблюдаются малые области, предположительно, бейнита или сорбита, рисунок 1 е. Появление большого количества ферритной структуры, может быть, связано с обезуглероживанием основной матрицы металла. ЭДС анализ показал локальные перераспределения основных легирующих элементов. На границах наблюдается обеднение по Fe и обогащение по Cr, Mn, Mo с образованием, предположительно, карбидов в форме «сеток». Стоит отметить, о наличие мелкодисперсных выделений на основе Cr и Mo, предположительно карбидов типа $M_{23}C_6$ и M_6C .

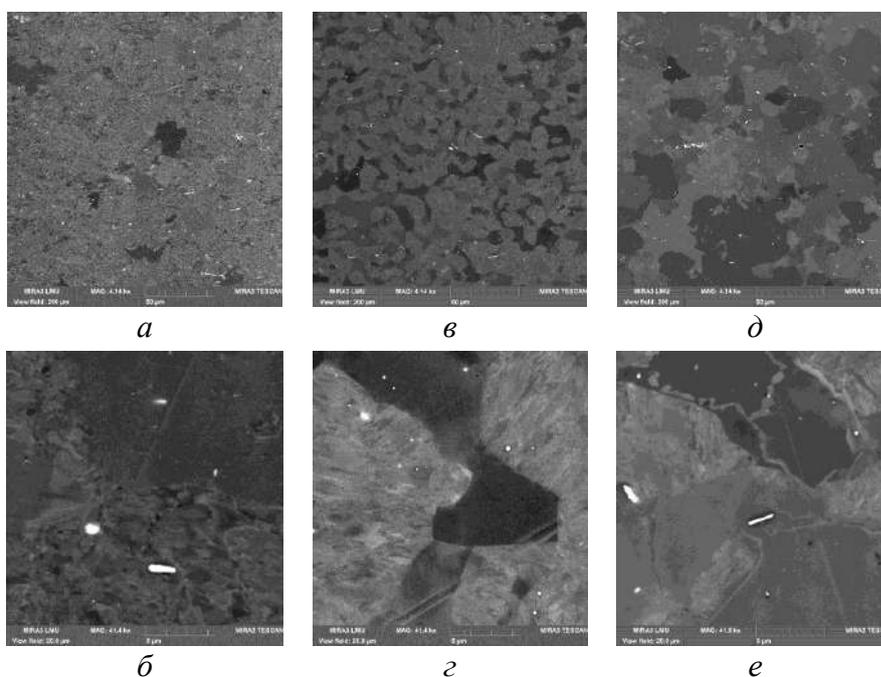


Рис. 1. Микроструктура стали X12M1BF в отраженных электронах: *а, б* – образец в исходном состоянии; *в, г* - образец после охлаждения в воде; *д, е* - образец после охлаждения в печи

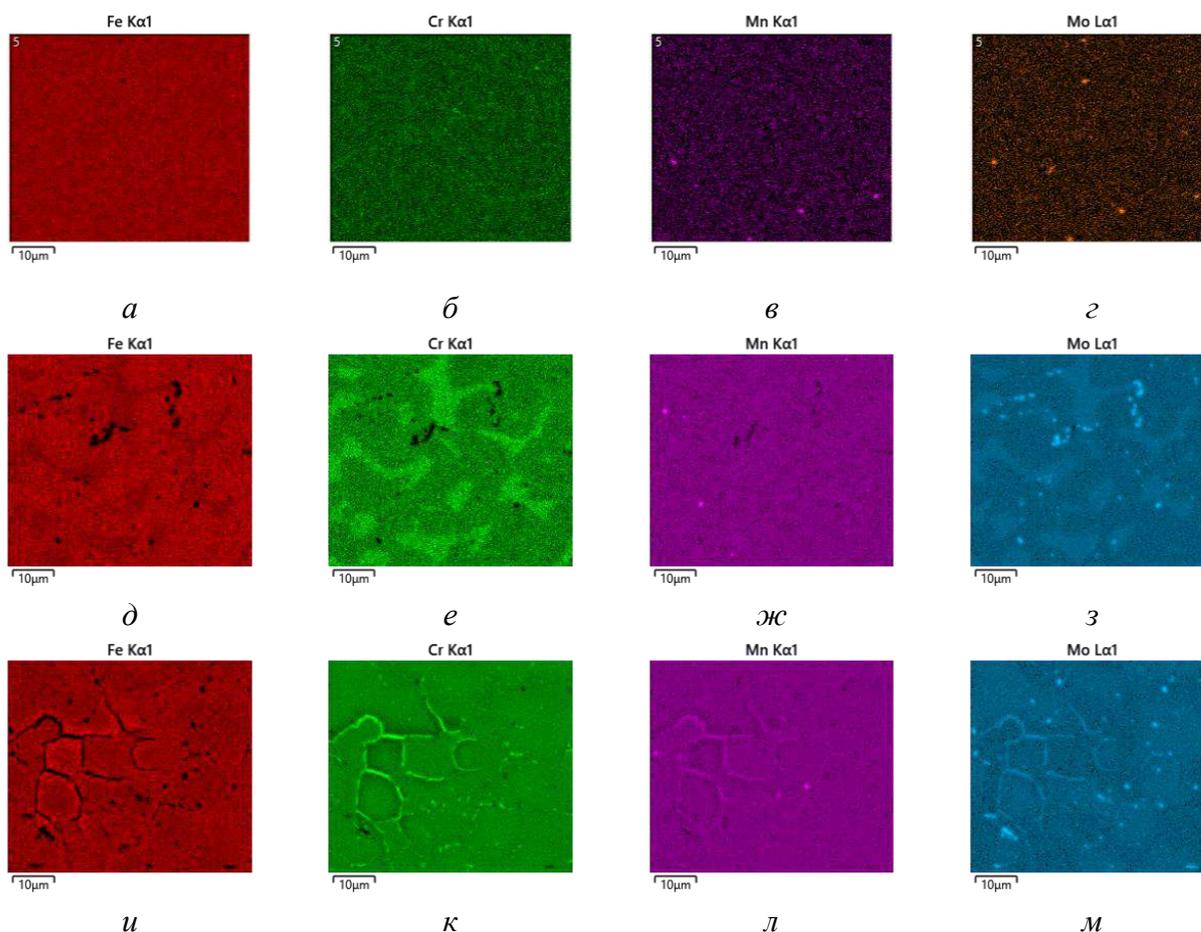


Рис. 2. Распределение химических элементов в стали X12M1BF: *а, б, в, г* – образец в исходном состоянии; *д, е, ж, з* – образец после охлаждения в воде; *и, к, л, м* – образец после охлаждения в печи

Для количественной оценки влияния скорости охлаждения на структурное состояние стали были определены доли структурных составляющих точечным методом. Результаты проведения анализа точечным методом показали, что в исходном состоянии доля феррита и мартенсита находится на одном уровне. Охлаждение в воде приводит к повышению доли мартенсита в структуре, тогда как медленное охлаждение к значительному увеличению доли феррита, таблица 2.

Таблица 2

Соотношение феррита и мартенсита (бейнита) после проведения термических обработок, %

ТО \ Фазы	Исходное состояние	Охлаждение в воде	Охлаждение в печи
Феррит	56,2	35,5	80,4
Мартенсит (бейнит)	43,8	64,5	19,6

В результате охлаждения из высокотемпературной области с различными скоростями в структуре стали наблюдается изменение

структурно-фазового состояния. Уменьшение скорости охлаждения приводит к увеличению доли феррита в структуре материала. Происходит локальное перераспределение легирующих элементов. В случае охлаждения в воде наблюдается неравномерное распределение хрома между мартенситом и ферритом. Охлаждение в печи приводит к локальному перераспределению основных элементов стали (Fe, Cr, Mo, Mn), особенно проявляющееся на границах зерен феррита, в результате чего образуются карбиды на основе Cr, Mo, Mn в форме сеток. Стоит отметить, о наличии мелкодисперсных выделений вторых фаз по границам структурных составляющих.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Будов В. М. Конструирование основного оборудования АЭС: Учеб. пособие для вузов / В. М. Будов, В. А. Фарафонов / М.: Энергоатомиздат, 1985. 264 с.
2. Шемякин В. Н. Структура и свойства оболочек опытных тепловыделяющих элементов из стали 12X13M2BF / Шемякин В. Н., Щербakov Е. Н., Козлов А. В., Панченко В. Л., Барсанова С. В. // Вопросы атомной науки и техники, 2007, 407-411 с.
3. Конструкционные материалы ядерных реакторов: учебник для вузов / Бескоровайный Н. М [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1995. 704 с.
4. Прецизионные нержавеющие трубы для атомной энергетики / А. В. Серебряков, С. А. Ладыгин, В. В. Мальцев [и др.] // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина», — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. С. 529–536.

REFERENCES

1. Budov V. M. Design of NPP main equipment: Textbook for universities / V. M. Budov, V. A. Farafonov / Moscow: Energoatomizdat, 1985. 264 с.
2. Shemyakin V. N. Structure and properties of the shells of the experimental fuel elements made of 12X13M2BF steel / Shemyakin V. N., Shcherbakov E. N. N., Scherbakov E. N., Kozlov A. A. V. V., Panchenko V. L., Barsanova S. V. // Voprosy Atomic Science and Nuclear Science. V. // Voprosy atomnoy nauki i tekhnika, 2007, 407–411 с.
3. Structural materials of nuclear reactors: textbook for universities / Beskorovainy N. M. [et al.]. Moscow: Energoatomizdat, 1995. 704 с.
4. Precision stainless steel pipes for nuclear power engineering / A. V. Serebryakov, S. A. Ladygin, V. V. Maltsev [et al.] // Innovative technologies in metallurgy and mechanical engineering: Proceedings of the 6th International Youth Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering. Ural Scientific and Pedagogical School named after Professor A. F. Golovin", - Ekaterinburg: Izd-v. Ural. uncta, 2012. С. 529–536.