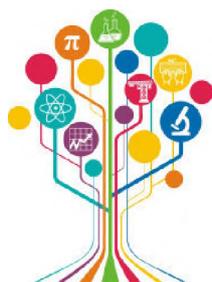


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

Том 1. Физика

Сборник научных трудов

XVIII Международной конференции студентов, аспирантов  
и молодых ученых

27–30 апреля 2021 г.

# PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT

Volume 1. Physics

Abstracts

XVIII International Conference of students, graduate students  
and young scientists

April 27–30, 2021



Национальный  
исследовательский

Томский  
государственный  
университет



Томск 2021

УДК 669.018.25 539.219 539.25

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-823 ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

К.В. Алмаева

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. И.Ю. Литовченко

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: [kzeni\\_va\\_almaeva@mail.ru](mailto:kzeni_va_almaeva@mail.ru)

## FEATURES OF THE DEFORMED MICROSTRUCTURE OF FERRITIC-MARTENSITIC STEEL EP-823 AFTER HIGH-TEMPERATURE THERMOMECHANICAL TREATMENT

K.V. Almaeva

Scientific Supervisor: Docent, Dr. I.Yu. Litovchenko

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: [kzeni\\_va\\_almaeva@mail.ru](mailto:kzeni_va_almaeva@mail.ru)

**Abstract.** *The features of the microstructure of 12% chromium ferritic-martensitic steel EP-823 near the neck region of samples deformed by tension at  $T=-70$ – $-40$  °C,  $T = 20$  °C and in the temperature range close to the operating temperatures of a nuclear reactor  $T = 650$ – $720$  °C after high – temperature thermomechanical treatment (HTMT) are investigated. It is shown that at  $T=-70$  °C,  $-40$  °C and  $20$  °C plastic deformation leads to curvature and fragmentation of martensitic lamellae and formation of new low-angle boundaries. Deformation near the operating temperature range contributes to the development of dynamic polygonization, recrystallization and an increase in the density and sizes of carbide particles.*

**Введение.** В качестве одного из конструкционных материалов для тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) новых ядерных и термоядерных реакторов планируется использовать 9-12% хромистые ферритно-мартенситные стали [1, 2]. В связи с условиями эксплуатации ТВЭЛов, основной задачей при изучении сталей такого класса является исследование высокотемпературных ( $T=650$ - $720$  °C) механических свойств. В ферритно-мартенситных сталях при температурах  $T=-70$  –  $-40$  °C наблюдается вязко-хрупкий переход. При облучении он может сдвигаться в область «положительных» температур, что определяет необходимость изучения низкотемпературных свойств ферритно-мартенситных сталей. Высокотемпературные термомеханические обработки (ВТМО) являются одним из способов модификации микроструктуры сталей с целью повышения их механических свойств [1, 2]. Показана перспективность применения ВТМО для повышения прочностных свойств ферритно-мартенситной стали ЭК-181 [2].

В настоящей работе представлены результаты исследований особенностей деформированной микроструктуры ферритно-мартенситной стали ЭП-823 (Fe-12Cr-Mo-W-Si-V-W-Nb) после ВТМО вблизи области шейки при температурах растяжения:  $T = -70$  °C,  $-40$  °C,  $20$  °C,  $650$  °C,  $720$  °C.

**Экспериментальная часть.** Исследована жаропрочная 12%-ная хромистая ферритно-мартенситная сталь ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). Элементный состав стали представлен в таблице 1. ВТМО состояла из нагрева  $T = 1100$  °C, выдержки 1

час, горячей пластической деформации прокаткой до величины  $\epsilon \approx 50\%$  и последующей закалки в воду. После деформации проводили отпуск при  $T = 720 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 ч. Механические испытания на растяжение при отрицательных температурах проводили в смеси жидкого азота и этилового спирта, при комнатной температуре – на воздухе, при температурах  $T = (650 - 720 \text{ }^\circ\text{C})$  – в вакууме  $\approx 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$  на испытательной машине типа «Поляни». Образцы для испытаний были подготовлены в форме двойных лопаток с размерами рабочей части  $13 \times 2 \times 1 \text{ мм}$ .

Таблица 1

Элементный состав стали ЭП-823 (вес. %, основа Fe)

C	Cr	Mn	Mo	Nb	V	W	Ni	N	Si	Ce	Ti	B	Al
0.14	11.56	0.58	0.74	0.40	0.34	0.68	0.68	0.03	1.09	0.10	0.01	0.006	0.02

Структурные исследования проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа Philips CM12 при ускоряющем напряжении 120 кВ. Тонкие фольги для просвечивающей электронной микроскопии были приготовлены с использованием фокусированной ионно-лучевой системы Hitachi FB-2100.

**Результаты.** В работе [3] показано, что интервале температур, указанном выше, в стали ЭП-823 наблюдается повышение прочностных свойств после ВТМО относительно традиционной термической обработки (закалка+отпуск  $720 \text{ }^\circ\text{C}$ , 3 ч.).

Исследования особенностей микроструктуры стали вблизи области шейки после растяжения показали, что при  $T = -70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается искривление мартенситных ламелей и их фрагментация с образованием новых малоугловых границ (рис. 1 а). О наличии малоугловых границ свидетельствуют множественные азимутальные разориентировки на дифракционной картине (рис. 1 б). Помимо матричных рефлексов на электронограмме наблюдаются рефлексы частиц  $M_{23}C_6$ .

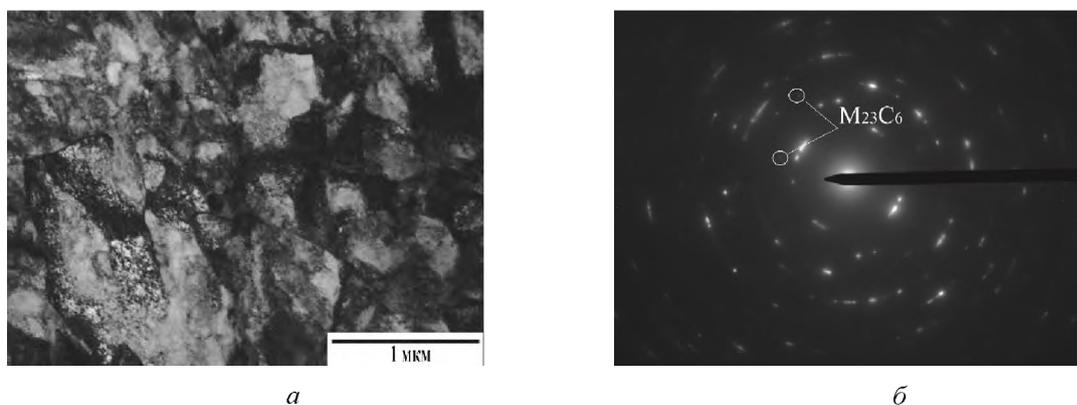


Рис. 1. Микроструктура стали ЭП-823 вблизи области шейки при  $T = -70 \text{ }^\circ\text{C}$ : а – светлопольное изображение; б – соответствующая микродифракционная картина

При повышении температуры деформации до  $T = 650-720 \text{ }^\circ\text{C}$  вблизи области шейки в структуре наблюдается развитие динамической полигонизации, рекристаллизации, а также изменения в карбидной подсистеме. Мартенситные ламели трансформируются в более равноосные фрагменты с мало- и высокоугловыми границами разориентации. В отдельных фрагментах наблюдается высокая плотность дислокаций, которые закреплены мелкодисперсными частицами типа MX (где М – V, Nb, X – C, N). Размеры грубодисперсных частиц  $M_{23}C_6$  в области шейки увеличиваются по сравнению с таковыми в

недеформированном состоянии (рис. 2 а, б). Повышение температуры деформации до 720 °С приводит к более интенсивному развитию динамической полигонизации и рекристаллизации с образованием практически равноосных зерен (субзерен).

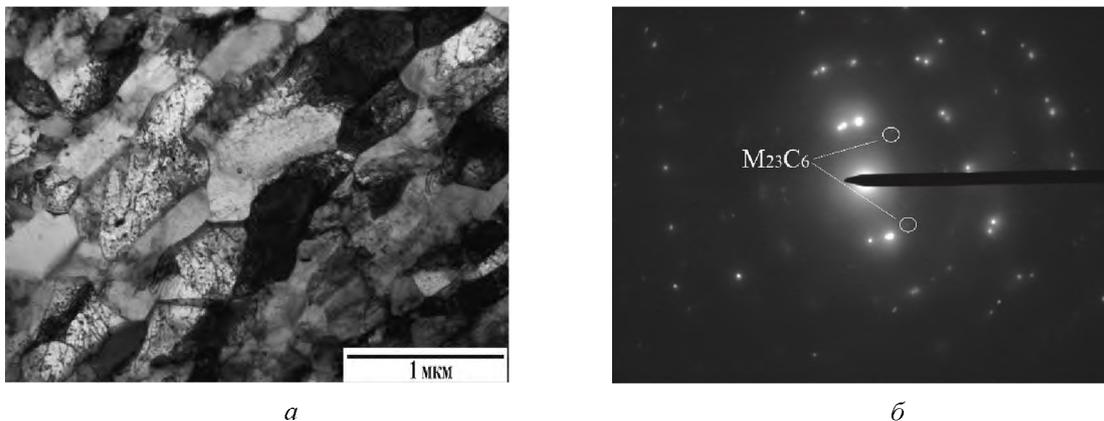


Рис. 2. Микроструктура стали ЭП-823 вблизи области шейки при  $T=650$  °С: а – светловольное изображение; б – соответствующая микродифракционная картина

**Заключение.** Показано, что вблизи области шейки образцов, деформированных растяжением образцов стали ЭП-823 при  $T=-70$ ,  $-40$  °С и  $20$  °С пластическая деформация приводит к искривлению и фрагментации мартенситных ламелей, а также образованию новых малоугловых границ. Пластическая деформация вблизи интервала рабочих температур способствует развитию процессов динамической полигонизации, рекристаллизации и увеличению плотности и размеров карбидных частиц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-38-90139\_аспиранты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klueh R.L., A.T. Nelson. Ferritic/martensitic steels for next-generation reactors // Journal of Nuclear Materials. – 2007. – № 371. – P. 37-52.
2. Полехина Н.А. и др. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки в аустенитной области на микроструктуру и механические свойства малоактивируемой 12%-ной хромистой ферритно-мартенситной стали ЭК-181. // ЖТФ. – 2017. – Т. 87, вып. 5. – С. 716-721.
3. Алмаева К.В., Литовченко И.Ю., Полехина Н.А. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на микроструктуру, механические свойства и особенности разрушения ферритно-мартенситной стали ЭП-823 // Известия ВУЗов. Физика. – 2020. – Т. 63., №5. – С. 85-89.