

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# **ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА**

## **СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XV РОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**18–20 мая 2016 г., г. Томск, Россия**

Томск  
Издательский Дом Томского государственного университета  
2016

## **Микроструктура и механические свойства 12%-ной хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после различных режимов термической обработки**

*Д.А. Кравченко<sup>1</sup>, Н.А. Полехина<sup>1,2</sup>, И.Ю. Литовченко<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021, г. Томск  
E-mail: Kravcdasha@yandex.ru

## **Microstructure and mechanical properties of 12% Cr ferritic-martensitic steel EP-823 after various modes of heat treatment**

*D.A. Kravchenko<sup>1</sup>, N.A. Polehina<sup>1,2</sup>, I. Yu. Litovchenko<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University, 634050, Tomsk

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 634021, Tomsk,  
E-mail: Kravcdasha@yandex.ru

Основными кандидатами для материалов ТВЭЛов ядерных реакторов нового поколения являются стали ферритно-мартенситного класса. Для этих сталей стоят задачи повышения высокотемпературной (вблизи предполагаемых рабочих температур) прочности и снижения склонности к низкотемпературному охрупчиванию.

В настоящей работе предпринята попытка модификации микроструктуры ферритно-мартенситной стали ЭП-823 (16Х12МВСФБР) с целью повышения ее высокотемпературной прочности с помощью термических обработок. Структурно-фазовые исследования проводили методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием электронного микроскопа Philips CM12. Механические испытания проводили методом активного растяжения при разных температурах.

Традиционная термическая обработка (ТТО) такой стали состоит в закалке от  $T = 1\ 100^\circ\text{C}$  (1 ч) на воздух и отпуске при  $T = 720^\circ\text{C}$  (3 ч). Предложенный ступенчатый режим обработки (СТО) включает закалку от  $1\ 100^\circ\text{C}$  (1 ч) в воду и отпуск при  $T = 620^\circ\text{C}$  (1 ч) +  $720^\circ\text{C}$  (1 ч).

Электронно-микроскопическое исследование показало, что после ТТО структурно-фазовое состояние стали представлено ламелями отпущенного мартенсита и отдельными ферритными зернами. В ферритно-мартенситной структуре обнаружены относительно крупные частицы  $M_{23}C_6$  размерами до 250 нм. На границах зерен эти частицы имеют вытянутую форму, внутри зерен – округлую (рис. 1, а). Помимо указанных частиц наблюдаются наноразмерные (менее 10 нм) частицы карбонитрида ванадия V(C,

N), располагающиеся преимущественно на дислокациях. Плотность дислокаций в исследованном структурном состоянии составляет  $\sim 10^{10}$ – $10^{11}$  см<sup>-2</sup>.

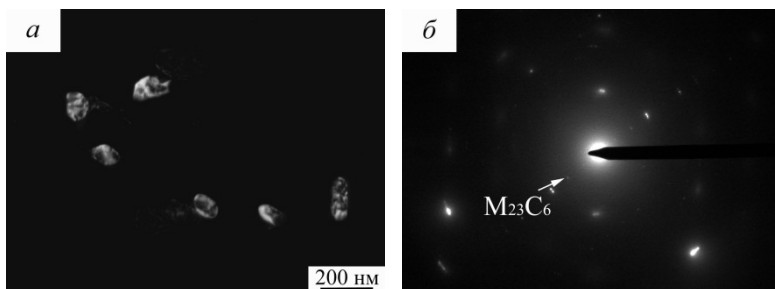


Рис. 1. Темнопольное (а) изображение карбидов  $M_{23}C_6$  и соответствующая микродифракционная картина (б) стали ЭП-823 после ТТО

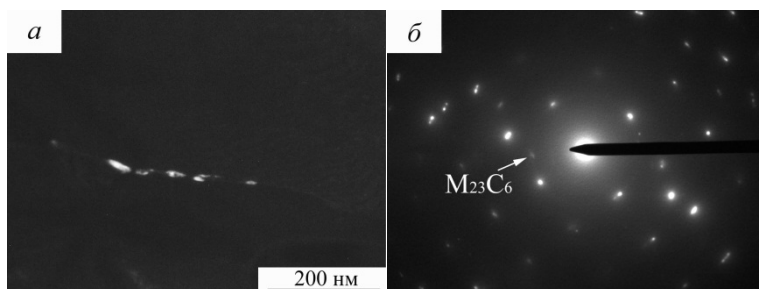


Рис. 2. Темнопольное (а) изображение карбидов  $M_{23}C_6$  и соответствующая микродифракционная картина (б) стали ЭП-823 после СТО

Структурное состояние стали после СТО качественно подобно рассмотренному выше. Однако размеры и плотность частиц  $M_{23}C_6$  после такой обработки в несколько раз меньше. На рис. 2 представлено темнопольное изображение частиц, расположенных на границе мартенситной ламели и имеющих размеры от 5 до 40 нм.

Механические испытания на растяжение (таблица) стали ЭП-823 показали, что в результате ступенчатой термообработки величина предела текучести при  $T = 650^\circ\text{C}$  увеличивается по сравнению с ТТО. При этом пластичность остается на достаточно высоком уровне ( $\approx 12\%$ ).

Более высокая скорость закалки (закалка в воду) в режиме СТО способствует повышению содержания углерода в твердом растворе. Отпуск при пониженной температуре обеспечивает уменьшение критических размеров зародышей второй фазы. Это приводит к уменьшению размеров и

плотности грубодисперсных частиц  $M_{23}C_6$  после СТО (по сравнению с ТТО) и, как показано в работах [1, 2], способствует повышению плотности наноразмерных частиц  $V(C, N)$  в ферритно-мартенситных сталях. Указанные эффекты способствуют увеличению эффективности дисперсного упрочнения.

### Механические свойства стали ЭП-823

Режим обработки	Температура испытаний			
	$T = 20^{\circ}C$		$T = 650^{\circ}C$	
	$\sigma_{0,1}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,1}$ , МПа	$\delta$ , %
ЭП-823				
ТТО	783	13,14	352	10,7
СТО	759	10,36	374	12,5

Таким образом, в настоящей работе показана возможность перераспределения углерода между карбидными фазами  $M_{23}C_6$  и  $V(C, N)$  с помощью ступенчатых термических обработок (СТО) и повышения кратковременной высокотемпературной прочности стали ЭП-823.

*Авторы выражают благодарность В.М. Чернову и М.В. Леонтьевой-Смирновой (ОАО ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, г. Москва) за предоставленные материалы.*

### Литература

1. Polekhina N.A., Litovchenko I.Yu., Tyumentsev A.N., Astafurova E.G., Chernov V.M., Leontieva-Smirnova M.V. The effect of annealing temperature on the features of structural phase transformations of the hardened ferritic-martensitic steel EK-181 // Journal of nuclear materials. 2014. V. 455. P. 496–499.
2. Litovchenko I.Yu., Polekhina N.A., Tyumentsev A.N., Astafurova E.G., Chernov V.M., Leontieva-Smirnova M.V. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of heat-resistant ferritic-martensitic steel EK-181 // Journal of nuclear materials. 2014. V. 455. P. 665–668.