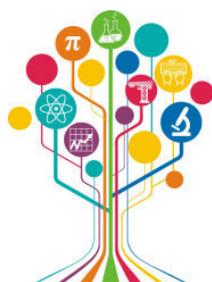


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



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

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА
МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ
ЭП-823**

В.В. Линник, 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: lera.linnik.1999@mail.ru

**THE EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE THERMOMECHANICAL TREATMENT ON THE
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF FERRITIC-MARTENSITIC STEEL
EP-823**

V.V. Linnik, K.V. Almaeva

Scientific Supervisor: assistant professor, Dr., I. Yu. Litovchenko

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

E-mail: lera.linnik.1999@mail.ru

Abstract. *Mechanical properties of ferritic-martensitic steel EP-823 after traditional heat treatment (normalized and tempered, N&T) and high-temperature thermomechanical treatment (HTMT) were studied. It is shown that after HTMT at room temperature, the value of the yield point increases by about 90 MPa, the tensile strength by 50 MPa; at elevated test temperatures, the strengthening effects are less significant. The studies of the microstructure of steel after HTMT have shown that such treatment leads to an increase in the dislocation density and in dispersion and volume fraction of nanoscale particles of vanadium carbonitride V (C, N). Such particles are capable to provide thermal stability of a microstructure and enhanced values of long-term high-temperature strength of the steel. This modification of the structural and phase state of the steel can provide an increase in the expected operating temperatures.*

Введение. Жаропрочные ферритно-мартенситные стали с содержанием 12% хрома являются перспективными конструкционными материалами для ядерных и термоядерных энергетических реакторов нового поколения [1-4]. Для расширения диапазона рабочих температур этих сталей необходимо повысить их жаропрочность, а также снизить склонность к низкотемпературному охрупчиванию. Для решения этих проблем используются различные термические и термомеханические обработки. Обычно для сталей ферритно-мартенситного класса используется традиционная термообработка (ТТО), которая заключается в закалке и высокотемпературном отпуске. Использование высокотемпературных термомеханических обработок (ВТМО) сталей с пластической деформацией в аустенитной области является одним из способов повышения их прочностных свойств. В работе [4] на ферритно-мартенситной стали ЭК-181 показано, что ВТМО приводит к увеличению плотности дислокаций и объемной доли наноразмерных частиц карбонитридной фазы типа MX (M – V, Nb и др., X – C, N), и тем самым увеличивает эффективность дисперсионного и субструктурного упрочнения.

В настоящей работе проведено сравнительное исследование механических свойств и особенностей микроструктуры стали ЭП-823 после ТТО и ВТМО.

Материалы и методы исследования. В качестве материала для исследования была выбрана 12%-ная хромистая ферритно-мартенситная сталь ЭП-823, элементный состав которой представлен в таблице 1. ТТО включала закалку от температуры 1100 °С 1 час и отпуск при 720 °С 3 часа. ВТМО включала нагрев до 1100 °С с выдержкой 1 час, горячую пластическую деформацию прокаткой до величины $\epsilon \approx 50\%$ и последующий отпуск при $T = 720$ °С в течение 1 ч.

Таблица 1

Элементный состав стали ЭК-181 (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

Механические испытания осуществляли в интервале температур от 20 до 720 °С методом активного растяжения в вакууме $\sim 3 \times 10^{-3}$ Па. Образцы были изготовлены в форме двойных лопаток с размерами рабочей части $\sim 13 \times 2 \times 1$ мм. Структурные исследования проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа Philips CM12 при ускоряющем напряжении 120 кВ. Фольги для просвечивающей электронной микроскопии готовили методом электролитической полировки в растворе хромового ангидрида CrO_3 в ортофосфорной кислоте H_3PO_4 .

Результаты. Сравнительные исследования кратковременных механических свойств стали ЭП-823 после традиционной термообработки и высокотемпературной термомеханической обработки в интервале от 20 до 720 °С показали, что вид их температурных зависимостей после ТТО и ВТМО качественно аналогичен (рис. 1). При 20 °С разница значений пределов текучести после ВТМО и ТТО составляет примерно 90 МПа, при 650 °С – 32 МПа, а при 720 °С – 24 МПа. В процентном соотношении разница пределов текучести после ТТО и ВТМО составляет $\sim 10\%$. Прирост предела прочности менее значителен.

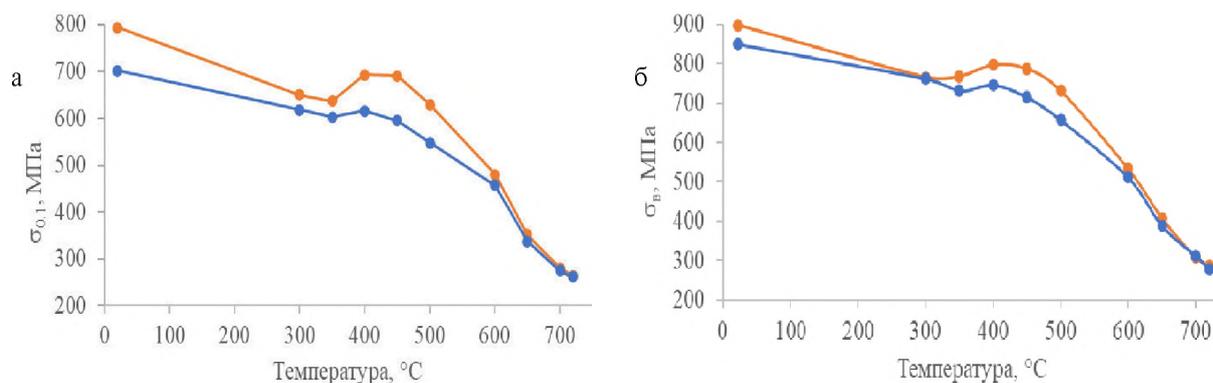


Рис. 1. Температурная зависимость механических свойств стали после ТТО (●) и ВТМО (●):

а) предел текучести; б) предел прочности

Электронно-микроскопические исследования показали, что микроструктура стали представлена субмикронными ламелями мартенсита и ферритными зёрнами. В ферритно-мартенситной структуре обнаружены мелкодисперсные частицы типа MX (M – V, Nb, X – C, N), размером до 20 нм (рис. 2 а). Помимо указанных частиц наблюдаются грубодисперсные частицы карбидов M_{23}C_6 , размером до 200 нм, имеющие преимущественно округлую форму (рис. 2 б).

Сравнительные исследования микроструктуры стали ЭП-823 после ТТО и ВТМО показали, что основные различия между обработками заключаются, во-первых, в уменьшении в результате ВТМО

плотности частиц $M_{23}C_6$; во-вторых, в повышении плотности дислокаций, в третьих, в увеличении объемной доли и дисперсности частиц $V(C, N)$. Плотность карбидов $M_{23}C_6$ после высокотемпературной термомеханической обработки ниже, чем после традиционной термообработки, что связано с обеднением твердого раствора углеродом при образовании большого количества наноразмерных частиц типа MX .

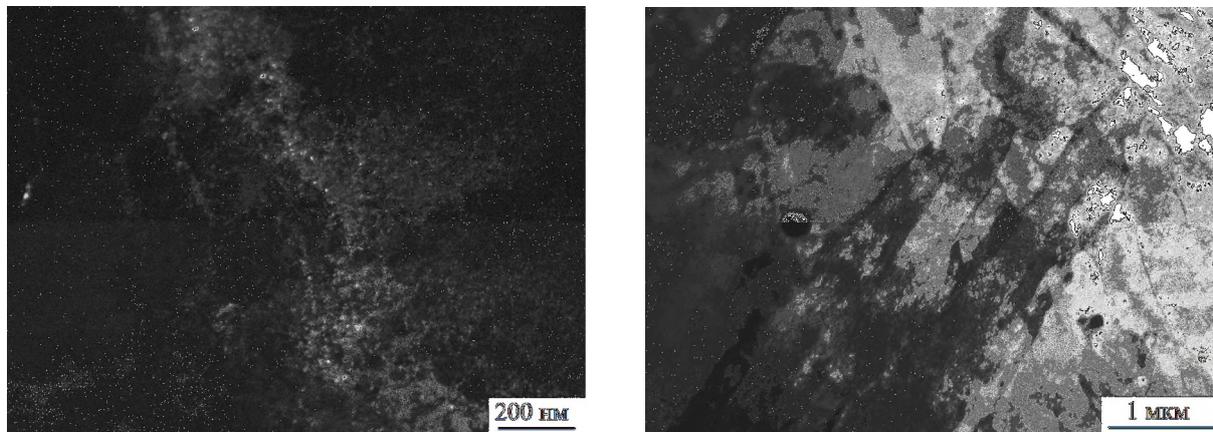


Рис. 2. Микроструктура стали ЭП-823 после ВТМО: а) темнопольное изображение в рефлексе частиц типа MX ; б) светлопольное изображение ферритно-мартенситной структуры, содержащей карбиды $M_{23}C_6$

Заключение. Показано, что ВТМО с деформацией $\varepsilon \approx 50\%$ обеспечивает формирование микроструктуры с высокой дисперсностью и объемной долей мелкодисперсных частиц типа MX , а также приводит к увеличению в несколько раз плотности дислокаций, по сравнению с состоянием после ТТО. Плотность грубодисперсных карбидов $M_{23}C_6$ при этом уменьшается. Структурные состояния, сформированные после высокотемпературной термомеханической обработки, обеспечивают повышение предела текучести и предела прочности стали ЭП-823 во всем интервале температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klueh R.L., Hashimoto N., Maziasz P. J. New nano-particle-strengthened ferritic/martensitic steels by conventional thermo-mechanical treatment // Journal of Nuclear Materials. - 2007. - V. 367-370. - P. 48-53.
2. Hollner S., Fournier B., Le Pendu J., Cozzika T., Toumie L, Brachet J.-C., Pineau A. High-temperature mechanical properties improvement on modified 9Cr-1Mo martensitic steel through thermomechanical treatments // Journal of Nuclear Materials. - 2010. - V.405. - P. 101-108.
3. Hoffman J., Rieth M., Commin L., Fernandez P., Roldan M. Improvement of reduced activation 9%Cr steels by ausforming // Nuclear Materials and Energy. - 2016. - V.6. - P. 12-17.
4. Полехина Н.А., Литовченко И.Ю., Тюменцев А.Н., Кравченко Д.А., Чернов В.М., Леонтьева-Смирнова М.В. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки в аустенитной области на микроструктуру и механические свойства малоактивируемой 12%-ной хромистой ферритномартенситной стали ЭК-181 // Журнал технической физики. - 2017. Том 87. -Вып. 5. - С. 716-721.