

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР ФЕРРИТНО-  
МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181 С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ  
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

К.В. Алмаева, Н.А. Полехина

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

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

E-mail: [kсени\\_я\\_алмаева@mail.ru](mailto:kсени_я_алмаева@mail.ru)

**THE STUDY OF THE POSSIBILITIES OF THE OPERATING TEMPERATURES OF FERRITIC-  
MARTENSITIC STEEL EK-181 INCREASING BY HIGH TEMPERATURE  
THERMOMECHANICAL TREATMENT**

K.V.Almaeva, N.A.Polekhina

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

National Research Tomsk State University, Tomsk, Lenina Str.36, 634050

E-mail: [kсени\\_я\\_алмаева@mail.ru](mailto:kсени_я_алмаева@mail.ru)

***Abstract.** High-temperature ( $T = 650\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) mechanical properties of ferritic-martensitic steel EK-181 after traditional heat treatment (normalized and tempered, N&T) and high-temperature thermomechanical treatment (HTMT) were studied. It is shown that at high test temperatures HTMT leads to an increase in the strength properties of the steel relative to N&T. At tension temperature  $T = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$  the yield strength of the steel after HTMT is higher than the corresponding values after N&T at a temperature  $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 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.** В настоящее время жаропрочные малоактивируемые 12 %-ные хромистые ферритно-мартенситные стали являются приоритетными конструкционными материалами для ядерных и термоядерных энергетических реакторов нового поколения [1–4]. Для сталей такого класса поставлены две задачи: повышение уровня длительной высокотемпературной прочности и снижение тенденции к низкотемпературному охрупчиванию. В последнее время показаны возможности повышения высокотемпературной прочности ферритно-мартенситных сталей с помощью ВТМО [4–6]. Однако возможности повышения рабочих температур с использованием указанной обработки исследованы недостаточно.

В настоящей работе исследованы прочностные и пластические свойства стали ЭК-181 в интервале температур от  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  после ТТО и ВТМО. Методами просвечивающей электронной микроскопии изучены особенности микроструктуры стали после указанных обработок.

**Материалы и методы.** В качестве материала для исследования была выбрана 12%-ная хромистая ферритно-мартенситная сталь ЭК-181, 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 аустенизацию с нагревом до 1100 °С с выдержкой 1 час, горячую пластическую деформацию прокаткой до величины  $\varepsilon \approx 40\text{--}50\%$  и последующий отпуск при  $T = 720\text{ °С}$  в течение 1 ч.

Таблица 1

Элементный состав стали ЭК-181 (вес. %, основа Fe)

C	Cr	Mn	Mo	Nb	V	W	Ni	N	Ta	Ce	Ti	B	Zr
0.16	11.17	0.74	0.01	0.01	0.25	1.13	0.03	0.04	0.08	0.15	0.05	0.006	0.05

Механические испытания осуществляли при температуре 650–800 °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  $\text{CrO}_3$  в ортофосфорной кислоте  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

**Результаты.** Механические испытания на растяжение показали (таблица 2), что после ТТО при  $T = 650\text{ °С}$  предел текучести стали достигает 309 МПа, предел прочности – 337 МПа, относительное удлинение 12,3%. При повышении температур испытания до  $T = 800\text{ °С}$  значение предела текучести снижается на 196 МПа и составляет 113 МПа, предел прочности достигает 130 МПа, относительное удлинение 35%.

После ВТМО при  $T = 650\text{ °С}$  предел текучести достигает 429 МПа, что на 120 МПа больше, чем после ТТО. Предел прочности также увеличивается относительно ТТО и составляет 476 МПа. При повышении температур испытаний прочностные свойства снижаются. При этом значения прочностных свойств после ВТМО превышают таковые после ТТО в изученном температурном интервале.

Снижение прочностных свойств стали при повышении температуры связано с уменьшением напряжения Орована за счет термически активируемых процессов преодоления наноразмерных частиц карбонитрида ванадия  $\text{V}(\text{C}, \text{N})$  скользящими дислокациями [6].

Таблица 2

Механические свойства

Температура испытаний	Режим обработки					
	ТТО			ВТМО		
	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	$\delta$ , %	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	$\delta$ , %
$T = 650\text{ °С}$	309	337	12,3	429	476	11,8
$T = 700\text{ °С}$	225	244	11,2	344	381	11,5
$T = 720\text{ °С}$	211	228	28,4	316	364	9,5
$T = 800\text{ °С}$	113	130	35	172	194	12,6

Структурные исследования показали, что ВТМО приводит к увеличению плотности дислокаций, повышению дисперсности и объемной доли наноразмерных частиц карбонитрида ванадия V(C, N). При этом в ферритно-мартенситной структуре уменьшается (относительно ТТО) плотность грубодисперсных карбидов  $M_{23}C_6$ . Меньшая плотность указанных частиц связана с интенсивным обеднением твердого раствора углеродом при образовании наноразмерных частиц карбонитрида ванадия. Указанные частицы V(C, N) в условиях ВТМО формируются уже в процессе охлаждения после высокотемпературной деформации.

Таким образом, ВТМО повышает эффективность дисперсного и субструктурного упрочнения, что способствует повышению пределов текучести и прочности при высоких температурах. Высокая плотность наноразмерных частиц может оказывать положительное влияние на характеристики длительной высокотемпературной прочности стали, путем закрепления дефектов микроструктуры, обеспечивая ее более высокую стабильность, в том числе в условиях ползучести[5, 6].

**Заключение.** Показано, что ВТМО с деформацией  $\varepsilon \approx 40\text{--}50\%$  ферритно-мартенситной стали ЭК-181 приводит к повышению кратковременных высокотемпературных прочностных свойств. Это обусловлено высокой плотностью наноразмерных частиц карбонитрида ванадия V(C, N) и повышенной плотностью дислокаций. При  $T = 720$  °С значения предела текучести стали после ВТМО превышают таковые после ТТО при  $T = 650$  °С. Это свидетельствует о возможности повышения рабочих температур стали с помощью ВТМО.

#### 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., Tournie I., 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 ферритно-мартенситной стали ЭК-181 // *Журнал технической физики*. – 2017. Том 87. – Вып. 5. – С. 716–721.
5. 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 steels EK-181 and Chs-139 // *Journal of Nuclear Materials*. – 2014. – V. 455. – P. 665–668.
6. Полехина Н.А., Литовченко И.Ю., Тюменцев А.Н., Кравченко Д.А., Чернов В.М., Леонтьева-Смирнова М.В. Микроструктура, механические свойства и особенности разрушения малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 в интервале температуры от  $-196$  до  $720$  °С // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*. – 2017. – Т. 40. – Вып. 4. – С. 92–102.