

УДК 669.1

И. С. Бражников*, Е. С. Ткачёв, Ю. И. Борисова

НИУ «БелГУ», г. Белгород

*vanya.brazhnikov@yandex.ru

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОРОГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ 9%Cr СТАЛИ, ЛЕГИРОВАННОЙ ТАНТАЛОМ

В работе представлено исследование пороговых напряжений в 9%Cr мартенситной стали, легированной танталом. Выявлено, что частицы карбонитридов (Nb, Ta) (C, N) и V (C, N) играют важную роль в дисперсионном упрочнении рассматриваемой стали. Рассчитанное для данных частиц упрочнение по механизму Орована составило 43 МПа.

Ключевые слова: ползучесть, мартенситная сталь, пороговые напряжения, электронная микроскопия

I. S. Brazhnikov, E. S. Tkachev, Yu. I. Borisova

ON THE ORIGIN OF THRESHOLD STRESSES IN TA-ADDED 9%Cr STEEL

The nature of threshold stress in Ta-added 9%Cr steel was investigated. The particles of (Nb, Ta) (C, N) and V (C, N) carbonitrides plays an important role in dispersion strengthening of the studied steel. The estimated Orowan stress from the MX carbonitrides is found to be a relatively high value of about 43 MPa

Key words: Creep, martensitic steel, threshold stress, electron microscopy

Жаропрочность большинства конструкционных жаропрочных сплавов обусловлена упрочнением частицами вторых фаз [1–3]. Известно, что частицы препятствуют движению дислокаций и таким образом затрудняют деформацию материала. При достижении минимального (порогового) напряжения, дислокационная ползучесть в таком материале не развивается [4]. С практической точки зрения обеспечение повышенных пороговых напряжений является важной задачей.

В работе представлено исследование пороговых напряжений в улучшенной 9%Cr стали 0,1С–9Cr–1,8W–0,6Mo–3Co–Nb–V–0,0013В–0,007N–0,085Ta, легированной танталом.

Эффективные напряжения σ представляют собой разницу между приложенным напряжением σ_a и пороговым напряжением σ_0 , связанным с влиянием частиц на подвижность дислокаций:

$$\dot{\varepsilon} = A(\sigma - \sigma_0)^n \exp(-Q / RT), \quad (1)$$

где n — это степенной показатель ползучести, а Q — энергия активации самодиффузии. Для расчета пороговых напряжений в исследуемой стали с использованием результатов испытаний на ползучесть были построены зависимости $\dot{\varepsilon}^{1/n}$ от σ при различных значениях n (рис. 1).

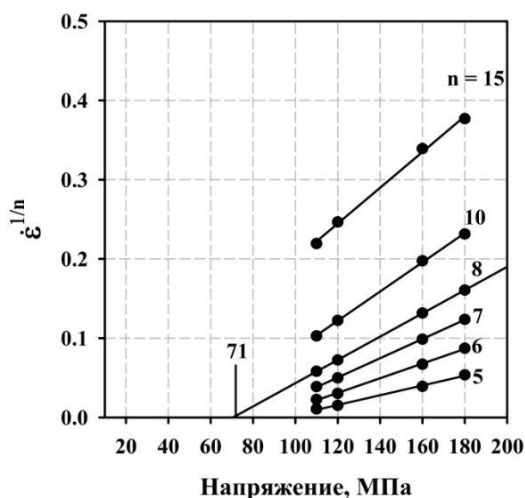


Рис. 1. Зависимость нормированной скорости деформации от напряжений при температуре 650 °C для исследуемой стали

Наилучшая корреляция с линейной зависимостью наблюдается при $n = 8$ ($r = 0,998$), а соответствующие пороговые напряжения составляют 71 МПа. Микроструктура рассматриваемой стали после термической обработки характеризуется большим количеством дисперсных частиц карбонитридов (Nb, Ta) (C, N) и V (C, N). Данные частицы показывают высокую стойкость к коагуляции при ползучести, их средний размер за 3 738 часов ползучести увеличился с 25 до 28 нм (рис. 2).

Для определения упрочняющего вклада частиц вторых фаз можно воспользоваться известной моделью Орована, описывающей взаимодействие дислокаций с частицами [4]:

$$\sigma_i = 0,3MGb / 2(1 + \nu)\lambda_i, \quad (2)$$

где λ_i — среднее расстояние между частицами, M — фактор Тейлора ($M = 3$), G — модуль сдвига (~ 59 ГПа при 650 °С), ν — коэффициент Пуассона, b — длина вектора Бюргерса ($0,25$ нм). Среднее расстояние между частицами было определено из объемной доли частиц f_v , рассчитанной в программе ThermoCalc, и их среднего радиуса r как:

$$N_s = \frac{3f_v}{2\pi r^2}; \quad (3)$$

$$\lambda_i = 0,5 N_s^{-1/2}. \quad (4)$$

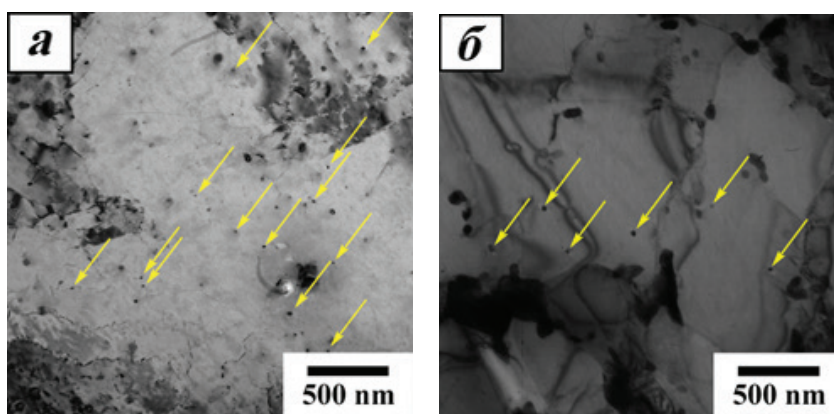


Рис. 2. Микроструктура исследуемой стали после термической обработки (а) и ползучести при напряжении 120 МПа и температуре 650 °С в течение 3738 ч (б) (стрелками указаны отдельные частицы карбонитридов типа МХ)

Рассчитанное с использованием уравнений (2–4) напряжение Орована от частиц (Nb, Ta) (C, N) и V (C, N) для исследуемой стали составило 43 МПа.

Полученные результаты указывают на значительный вклад частиц карбонитридов типа МХ в дисперсионное упрочнение 9%Cr мартенситной стали, легированной танталом, что, благодаря высокой стойкости данных частиц к коагуляции, обеспечивает относительно высокие пороговые напряжения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18–38–00052.

Литература

1. Abe F. Progress in creep-resistant steels for high efficiency coal-fired power plants // *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2016. V. 138. №. 4. P. 40804.
2. Tkachev E., Belyakov A., Kaibyshev R. Creep behavior and microstructural evolution of a 9% Cr steel with high B and low N contents // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. V. 725. P. 228–241.
3. The role of microstructure in creep strength of 9–12% Cr steels / R. Kaibyshev [et al.] // *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, 2017. V. 879. P. 36–41.
4. Dudko V. Belyakov A., Kaibyshev R. Origin of Threshold Stresses in a P92-type Steel // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2016. V. 69. №. 2. P. 223–227.