УДК 669.1.017

Р. В. Мишнев
Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
НИУ «БелГУ», г. Белгород
mishnev@bsu.edu.ru
Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук *Р. О. Кайбышев*

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 10Х10К3В2МФБР ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрено влияние амплитуды общей деформации в интервале 0,25–1 % на долговечность и микроструктуру мартенситной стали 10Х10К3В2МФБР при испытании на малоцикловую усталость (МЦУ) при комнатной температуре.

Ключевые слова: мартенситная сталь, деформация, долговечность.

ABSTRACT

Effect of total strain amplitude in the range of 0,25–1 % on the low cycle fatigue life and microstructure of a 10%Cr martensitic steel was studied at room temperature.

Key words: martensitic steel, deformation, low cycle fatigue life.

В качестве материалов для строительства паровых котлов в теплоэнергетической промышленности широко используются жаропрочные высокохромистые мартенситные стали. Основным достоинством данных сталей является низкая стоимость и высокое сопротивление ползучести.

Новая перспективная сталь мартенситного класса 10Х10К3В2МФБР, разработанная на основе стали Р92, демонстрирует высокое сопротивление ползучести при повышенных температурах, что обусловлено высокой стабильностью неравновесной структуры тростомартенсита, стабилизированной дисперсными частицами карбидов $M_{23}C_6$, преимущественно расположенными по границам исходных аустенитных зерен, пакетов, блоков и реек мартенсита, а также карбонитридов M(C,N), равномерно распределенных внутри реек.

Однако кроме высокой длительной прочности к данным сталям предъявляется требование низкой склонности к разупрочнению в результате малоцикловой усталости (МЦУ). Известно, что 65 % всех разрушений в высоконагруженных турбинах связаны с циклическими нагрузками, которые могут возникать при запуске оборудования, либо могут быть вызваны перепадами в режиме работы теплоэлектростанций [1]. Известно, что

© Мишнев Р. В., 2015

циклические нагрузки пагубно влияют на структуру, что негативно сказывается на длительной прочности материала.

В данной работе представлено исследование поведения стали 10Х10К3В2МФБР при испытании на малоцикловую усталость при комнатной температуре. Изучено влияние амплитуды деформации при испытании на МЦУ на усталостные характеристики и микроструктурные изменения стали.

Сталь была подвергнута закалке при 1060 °С и отпуску при 770 °С в течение 3 ч с последующим охлаждением на воздухе. Испытания на МЦУ проводились при жестком нагружении на испытательной машине Instron 8801 при температуре 20 °С с амплитудой общей деформации от 0,25 до 1 % и частотой 0,5 Гц. Исследование тонкой структуры проводили на просвечивающем электронном микроскопе JEOL-2100.

Сталь 10Х10К3В2МФБР после закалки и отпуска имеет структуру мартенсита отпуска с размером исходных аустенитных зерен (ИАЗ) 35 мкм, с высокой плотностью дислокаций ($1{,}7\times10^{14}$ м$^{-2}$) внутри мартенситных реек шириной 460 нм. Многочисленные наноразмерные карбиды $M_{23}C_6$ со средним размером 70 нм располагаются на границах реек, блоков, пакетов и ИАЗ [2].

В условиях циклического нагружения при комнатной температуре с заданной амплитудой деформации сталь 10Х10К3В2МФБР демонстрирует ярко выраженное разупрочнение, которое следует за короткой (до 100 циклов) стадией стабилизации напряжений (рис. 1, *а*). С увеличением ε_{ac} от 0,25 до 1,0 % количество циклов до разрушения уменьшается с 4×10^4 до 4×10^2 (рис. 1, *б*).

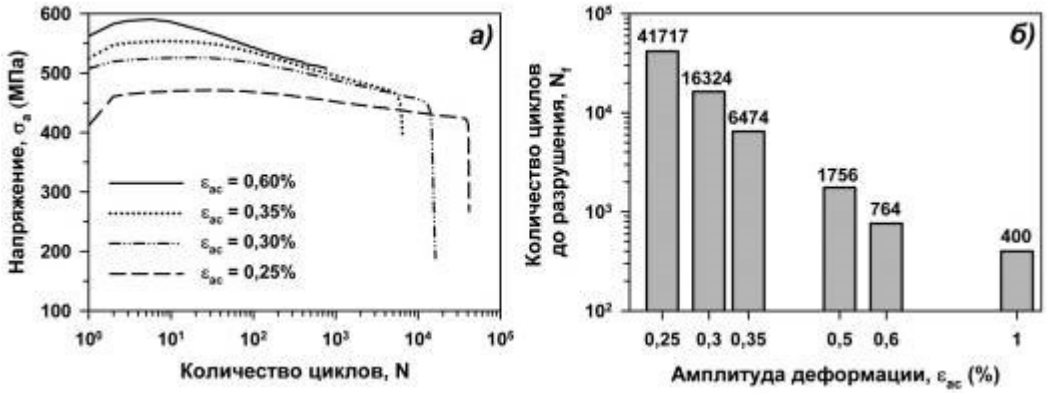

Рис. 1. Изменение амплитуды напряжения в процессе испытания на МЦУ стали 10Х10К3В2МФБР с различной амплитудой деформации (*а*). Зависимость малоцикловой долговечности стали 10Х10К3В2МФБР от амплитуды деформации (*б*)

Усталостное поведение стали 10Х10К3В2МФБР при МЦУ при комнатной температуре можно представить зависимостью амплитуды напряжения σ_a от амплитуды пластической деформации ε_{ap} (уравнение Морроу):

$$\sigma_a = K'(\varepsilon_{ap})^{n'} \Rightarrow \lg\sigma_a = \lg(807{,}2) + 0{,}07971\lg\varepsilon_{ap} \qquad 1)$$

а также зависимостью долговечности ($2N_f$ – количество нагружений до разрушения) от амплитуды деформации (уравнение Басквина-Коффина-Мэнсона):

$$\varepsilon_{ac} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = 0{,}0041(2N_f)^{-0{,}0609} + 0{,}1416(2N_f)^{-0{,}4998} \quad 2)$$

На рис. 2 представлены экспериментальные данные и кривые, полученные из уравнений 1 и 2. Из графика на рисунке 2, *а* видно, что при уровне полной амплитуды деформации свыше 0,5 % преобладает пластическая составляющая деформации, что свидетельствует о том, что сопротивление циклической деформации стали зависит от ее пластических свойств.

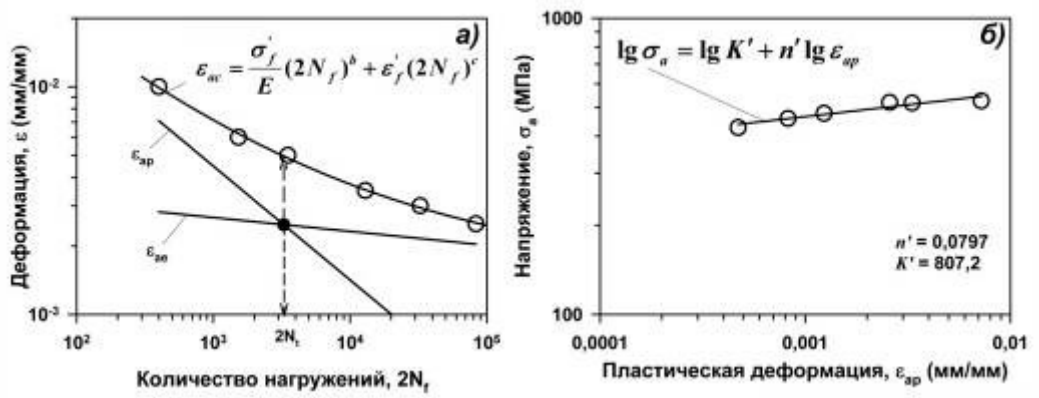

Рис. 2. Зависимость амплитуды напряжения от амплитуды пластической деформации (*а*); кривые малоцикловой усталости (амплитуда деформации – число нагружений до разрушения) Графическое отображение уравнения Басквина-Мэнсона-Коффина (*б*)

Исследование тонкой структуры показало, что под воздействием циклического нагружения структура троостита отпуска стали 10Х10К3В2МФБР нестабильна, происходит увеличение поперечного размера реек, они трансформируются в ячейки/субзерна округлой формы, уменьшается плотность решеточных дислокаций внутри ферритной матрицы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00173).

ЛИТЕРАТУРА

1. Golanski, G. Low cycle fatigue and cycling softening behavior of martensitic cast steel / G. Golanski, S. Mrozinski // Eng. Fail. Anal. – Vol. 35. – 2013. – P. 692–702.

2. Dudova N. Effect of tempering on microstructure and mechanical properties of boron containing 10%Cr steel / N. Dudova, R. Mishnev, R. Kaibyshev // ISIJ Int. – 2011. – V. 51. – P. 1912–1918.