

Р. В. Мишнев*, Н. Р. Дудова, Р. О. Кайбышев

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
г. Белгород

**mishnev@bsu.edu.ru*

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ЖАРОПРОЧНОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ 10X10K3B2MФБР В ПРОЦЕССЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

В работе рассмотрено влияние циклического нагружения на микроструктуру и микротвердость стали 10X10K3B2MФБР при комнатной температуре и амплитудах деформации $\pm 0,25$ % и $\pm 0,6$ %.

Ключевые слова: мартенсит, малоцикловая усталость, циклическое разупрочнение, микроструктура.

R. V. Mishnev, N. R. Dudova, R. O. Kajbyshev

MICROSTRUCTURE EVOLUTION DURING LCF OF A 10 % Cr STEEL AT AMBIENT TEMPERATURE

The influence of cyclic loading on microstructure and microhardness of a 10 % Cr steel with 3 % Co and 0.008 % B was examined at room temperature and total strain amplitudes of ± 0.25 % and ± 0.6 %.

Keywords: martensite, low cycle fatigue, cyclic softening, microstructure.

В качестве материалов для строительства паровых котлов и турбин в теплоэнергетической промышленности широко используются жаропрочные высокохромистые мартенситные стали. Основным достоинством данных сталей является низкая стоимость и высокое сопротивление ползучести. Так, новая перспективная сталь мартенситного класса 10X10K3B2MФБР, разработанная на основе стали P92, демонстрирует сверхвысокое сопротивление ползучести при повышенных температурах. Стабильность неравновесной структуры троостомартенсита, полученной после отпуска, является ключевым фактором, обеспечивающим высокое сопротивление ползучести [1]. Известно, что циклические нагрузки пагубно влияют на структуру, что негативно сказывается на длительной прочности материала. Поэтому, кроме высокой длительной прочности, к данным сталям предъявляется требование к низкой склонности к разупрочнению в результате малоцикловой усталости (МЦУ). Около 65% всех разрушений в высоконагруженных турбинах связаны с циклическими нагрузками, которые могут возникать при запуске

оборудования либо быть вызваны перепадами в режиме работы теплоэлектростанций [2].

Исследование влияния МЦУ на долговечность и структурные изменения в стали 10X10K3B2MФБР показало, что долговечность сильно зависит от амплитуды деформации и, в частности, от вклада пластической деформации в полную амплитуду деформации [3]. В данном исследовании было рассмотрено влияние амплитуды деформации на эволюцию микроструктуры стали 10X10K3B2MФБР при испытании на МЦУ при комнатной температуре.

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 $\pm 0,25\%$ (при которой доминирует упругая составляющая в полной амплитуде деформации) и $\pm 0,6\%$ (доминирует пластическая составляющая) с частотой 0,5 Гц [3]. Микротвердость определяли с помощью твердомера 402 MVD Wolpert при нагрузке 300 г. Исследование тонкой структуры проводили на просвечивающем электронном микроскопе JEOL-2100.

Сталь 10X10K3B2MФБР после закалки и отпуска имеет структуру мартенсита отпуска с размером исходных аустенитных зерен (ИАЗ) 35 мкм, с высокой плотностью дислокаций ($1,7 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$) 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 [1].

На рис. 1 представлена зависимость изменения напряжения от количества циклов испытания на МЦУ стали 10X10K3B2MФБР. Количество циклов до разрушения снижается с 41717 до 764 циклов при увеличении амплитуды деформации от $\pm 0,25\%$ до $\pm 0,6\%$. При циклическом нагружении при обеих амплитудах наблюдается упрочнение на начальной стадии. При дальнейшем увеличении количества циклов происходит разупрочнение стали. Стадия разупрочнения характеризуется коэффициентом разупрочнения $\Delta\sigma/\Delta \lg N$, где σ – напряжение, N – количество циклов. Видно, что увеличение амплитуды деформации приводит к увеличению коэффициента разупрочнения от 18 до 40.

На рис. 2 представлены петли гистерезиса для первого цикла; цикла, соответствующего стадии упрочнения; и цикла, равного половине количества циклов до разрушения, соответствующего стадии разупрочнения, для обеих амплитуд деформации.

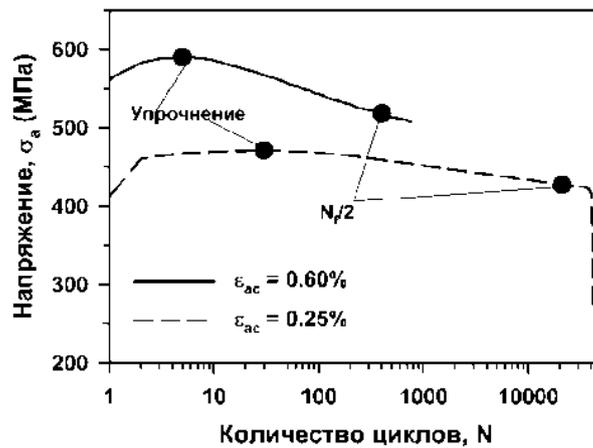


Рис. 1. Зависимость напряжения от количества циклов при испытании на МЦУ при комнатной температуре. Символы обозначают точки, в которых испытания были остановлены для изучения микроструктуры

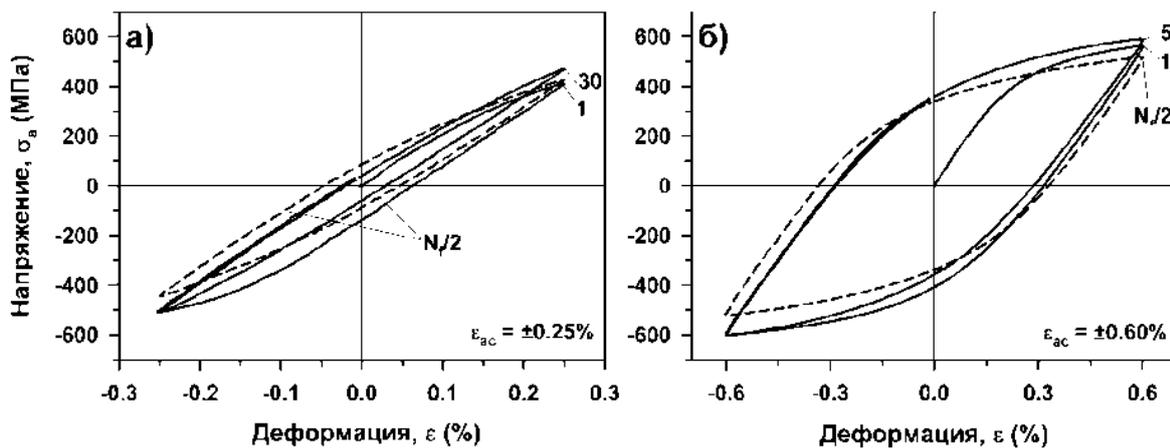


Рис. 2. Петли гистерезиса для стали 10X10K3B2MФБР при испытании на МЦУ при амплитуде деформации: а – $\pm 0.25\%$; б – $\pm 0.6\%$

При $\varepsilon_{ac} = \pm 0,25\%$ петля гистерезиса первого цикла имеет несимметричный профиль с выпячиванием при сжатии, что свидетельствует о деформационном упрочнении. При этом значение амплитуды напряжения при сжатии выше, чем при растяжении. Дальнейшее увеличение числа циклов приводит к формированию симметричных петель гистерезиса, при этом амплитуда напряжения уменьшается из-за разупрочнения. При $\varepsilon_{ac} = \pm 0,6\%$ увеличение числа циклов приводит к увеличению доли пластической деформации, о которой свидетельствует уширение петли, и уменьшению амплитуды напряжений.

Эволюция микроструктуры при циклической деформации представлена на рис. 3; микротвердость и микроструктурные параметры приведены в табл. 1. Микротвердость не снижается после 30 и 5 циклов испытаний на усталость при амплитудах $\pm 0,25\%$ и $\pm 0,6\%$, соответственно

(табл. 1), что соответствует циклическому деформационному упрочнению, происходящему на этой стадии (рис. 1).

На стадии разупрочнения при $N_f / 2$ микротвердость уменьшается приблизительно на -3 % и -6 % для $\epsilon_{ac} = \pm 0,25$ % и $\epsilon_{ac} = \pm 0,6$ % соответственно. В течение следующей половины испытания на усталость никаких существенных изменений в микротвердости не происходит, несмотря на то, что наблюдается циклическое разупрочнение (рис. 1). Это, вероятно, связано с уменьшением площади поперечного сечения образца после половины испытания из-за образования и роста усталостных трещин.

При низкой и высокой амплитудах деформации после 30 и 5 циклов происходит небольшое увеличение плотности дислокаций и ширины реек. При $\epsilon_{ac} = \pm 0,25$ % на стадии упрочнения никаких видимых изменений в структуре не было обнаружено (рис. 4, а), в то время как при $\epsilon_{ac} = \pm 0,6$ % реечные границы стали шире из-за притока дислокаций к границам и их захвата границами (рис. 4, б). На стадии разупрочнения при $N_f / 2$ наблюдается снижение плотности дислокаций на -43 % и -24 % для низкой и высокой амплитуды деформации, соответственно, относительно плотности дислокаций на стадии упрочнения (таблице).

Микротвердость и микроструктурные параметры после испытания на МЦУ на различных стадиях. Числитель/знаменатель соответствуют

$$\epsilon_{ac} = \pm 0,25\% / \epsilon_{ac} = \pm 0,6 \%$$

Исходное	Стадия упрочнения (30 / 5) циклов	Стадия разупрочнения $N_f / 2$ (21000 / 401) циклов	После разрушения (41717 / 764) циклов
Микротвердость, [HV]			
257,0	257,6 / 257,2	250,6 / 243,0	250,1 / 242,0
Ширина реек, [нм]			
400	400 / 400	520 / 465	600 / 500
Размер субзерен, [нм]			
390	435 / 435	470 / 425	600 / 500
Плотность дислокаций, $\times 10^{14}$ [м ⁻²]			
1,70	1,95 / 1,90	1,10 / 1,44	0,43 / 1,36

Увеличение ширины реек составляет +20 % и +8 % для $\epsilon_{ac} = \pm 0,25$ % и $\epsilon_{ac} = \pm 0,6$ % соответственно. При $\epsilon_{ac} = \pm 0,25$ % частицы, закрепленные по границам, эффективно сдерживают их миграцию (рис. 3, в), тогда как при $\epsilon_{ac} = \pm 0,6$ % происходит формирование субзерен и наблюдается отрыв границ от карбидов (рис. 3, г). Таким образом, на стадии разупрочнения после $N_f / 2$ цикла при $\epsilon_{ac} = \pm 0,6$ % происходит полигонизация, что подтверждается большим снижением микротвердости, чем при $\epsilon_{ac} = \pm 0,25$ %, где доминирует упругая составляющая. В то же время этот

процесс сопровождается активной работой источников дислокаций, что обеспечивает высокую плотность дислокаций внутри реек.

Увеличение размера реек продолжается и во второй части испытания на МЦУ с амплитудой деформации $\varepsilon_{ac} = \pm 0,25 \%$. Особенностью испытания при этой амплитуде является то, что решеточные дислокации активно скапливаются возле границ, однако слабо поглощаются границами реек, что приводит к 4-кратному снижению плотности дислокаций внутри реек и увеличению ширины границ. Напротив, при $\varepsilon_{ac} = \pm 0,6 \%$ интенсивное протекание реакций между решеточными дислокациями и дислокациями, составляющими границы реек, приводит к частичной трансформации реечных границ в субзеренные с образованием субзерен прямоугольной и круглой формы (рис. 3, *е*). Тем не менее, затрудненность трансформации реечных границ в субзеренные препятствует полному превращению реечной структуры в субзеренную. В результате при $\varepsilon_{ac} = \pm 0,6 \%$ плотность дислокаций выше и размер кристаллитов меньше, чем при $\varepsilon_{ac} = \pm 0,25 \%$. Вероятно, именно взаимодействие дислокаций с границами реек при амплитуде $\varepsilon_{ac} = \pm 0,6 \%$ отвечает за снижение микротвердости по сравнению с $\varepsilon_{ac} = \pm 0,25 \%$, несмотря на то, что плотность дислокаций внутри реек в три раза выше.

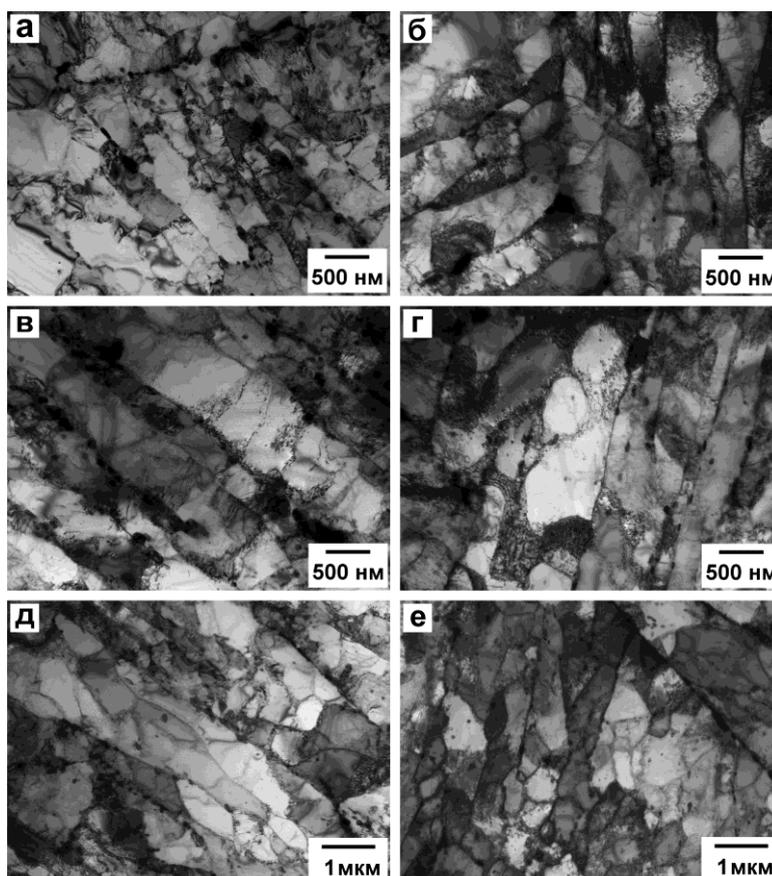


Рис. 3. Структура стали 10X10K3B2MФБР после испытания на МЦУ: *а, в, д* – $\varepsilon_{ac} = \pm 0,25 \%$; *б, г, е* – $\varepsilon_{ac} = \pm 0,6 \%$; *а, б* – на стадии упрочнения; *в, г* – на стадии разупрочнения после $N_f/2$ цикла; *д, е* – после разрушения

При испытании на МЦУ при комнатной температуре высокохромистая сталь мартенситного класса 10X10K3B2MФБР демонстрирует упрочнение на начальной стадии, которое связано с увеличением плотности дислокаций при амплитуде деформации $\pm 0,25$ и $\pm 0,6$ %. Дальнейшее циклическое разупрочнение обусловлено ростом размера реек и притоком решеточных дислокаций к границам реек при $\epsilon_{ac} = \pm 0,25$ % и частичной трансформацией реечных границ в субзеренные при $\epsilon_{ac} = \pm 0,6$ %.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Dudova N., Mishnev R., Kaibyshev R. Effect of tempering on microstructure and mechanical properties of boron containing 10%Cr steel // ISIJ Int., 2011. V. 51. P. 1912–1918.
2. Golanski G., Mrozinski S. Low cycle fatigue and cycling softening behavior of martensitic cast steel // Eng. Fail. Anal., 2013. V. 35. P. 692–702.
3. Mishnev R., Dudova N., Kaibyshev R. Low cycle fatigue behavior of a 10Cr–2W–Mo–3Co–NbV steel // Int. J. Fatigue, 2016. V. 83. P. 344–355.