

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ 10CR СТАЛИ, МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ РЕНИЕМ

И. С. Никитин, А. Э. Федосеева

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, РФ
nikitin_i@bsu.edu.ru

Аннотация. Исследовано влияние локализации деформации на структурные изменения при ползучести в условиях 650°C/140 МПа, время до разрушения составило 8785 часов. Величина локализации деформации оказывает влияние на речную структуру троостита отпуска: значительно увеличивается ширина реек с одновременным падением плотности дислокации. Локализация деформации ускоряет укрупнение карбидов $M_{23}C_6$, увеличивая их средний размер и снижая численную плотность по границам мартенситных реек.

Введение

Высокохромистые мартенситные стали нового поколения являются материалами для изготовления энергоблоков тепловых электростанций, работающих при суперсверхкритических параметрах пара [1]. Отличительная особенность легирования сталей нового поколения заключается в сниженном содержании азота и повышенном содержании бора. В данных сталях основной вклад в длительную прочность при ползучести вносят плотные цепочки карбида $M_{23}C_6$, располагающиеся на малоугловых границах (МУГ) мартенситных реек. Низкая скорость укрупнения частиц $M_{23}C_6$ обеспечивает долговременное сохранение речной структуры и высокой плотности дислокаций внутри реек, что обеспечивает высокое сопротивление ползучести [2,3]. Новая сталь, приведенная в работе, относится к сталям нового поколения, при этом дополнительно содержит в своем составе 0,17 вес.% Re. Ранее авторами было обнаружено [4], что добавление в сталь рения способствует выделению мелкодисперсных частиц фазы Лавеса и приводит к снижению скорости укрупнения частиц $M_{23}C_6$ и фазы Лавеса. Такое положительное влияние рения привело к значительному приросту времени до разрушения. Ранее о положительном влиянии фазы Лавеса на длительную прочность сообщалась в работах [5,6], где повышение вклада упрочнения от фазы Лавеса достигалось за счет увеличения содержания W от 0 до 4 вес.%. В данной работе к 10Cr-3Co-3W-0,002N-0,008B-0,2Re стали была

применена модифицированная термическая обработка, позволяющая увеличить вклад упрочнения от зернограницных частиц за счет повышения их численной плотности. Цель настоящей работы заключается в выявлении влияния величины локализации деформации на микроструктурные изменения при ползучести по режиму 650°C/140 МПа в 10Cr-3Co-3W-0,002N-0,008B-0,2Re стали.

Материал и методики

Исследуемая сталь следующего химического состава Fe(осн)-0,11C-0,03Si-0,14Mn-9,85Cr-3,2Co-0,13Mo-2,86W-0,23V-0,07Nb-0,03Ni-0,008B-0,002N-0,22Cu-0,17Re была получена методом вакуумного индукционного переплава. Термическая обработка заключалась в нормализации с температуры 1100°C в течение 1 ч с последующим отпуском при температуре 770°C, в течение 3 ч. Испытания на ползучесть проводились при температуре 650°C и приложенных напряжениях от 200 до 100 МПа с шагом 20 МПа до разрушения. В работе был исследован образец после испытания при напряжении 140 МПа. Структурные исследования проводились с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM JEOL-2100 (ПЭМ) и растрового электронного микроскопа Quanta 600 FEG (РЭМ).

Результаты и их обсуждение

Исходная структура

После термической обработки в исследуемой стали формируется структура троостита отпуска со средним размером исходных аустенитных зерен (ИАЗ) 105 мкм. Средняя ширина реек составила 300 нм, высокая плотность свободных дислокаций порядка $2 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ была обнаружена. Доминирующей вторичной фазой является карбид M_{23}C_6 , преимущественно расположенный вдоль границ структуры, средний размер которого составляет 59 нм, плотность частиц по границам – $2,56 \text{ мкм}^{-1}$. В структуре также встречаются зернограницные частицы карбида M_6C со средним размером 44 нм и частицы MX со средним размером 34 нм, располагающиеся внутри мартенситных реек.

Поведение при ползучести

На рис. 1 представлены данные о поведении исследуемой 10Cr-3Co-3W-0,002N-0,008B-0,2Re стали при ползучести при температуре 650°C и приложенном напряжении 140 МПа.

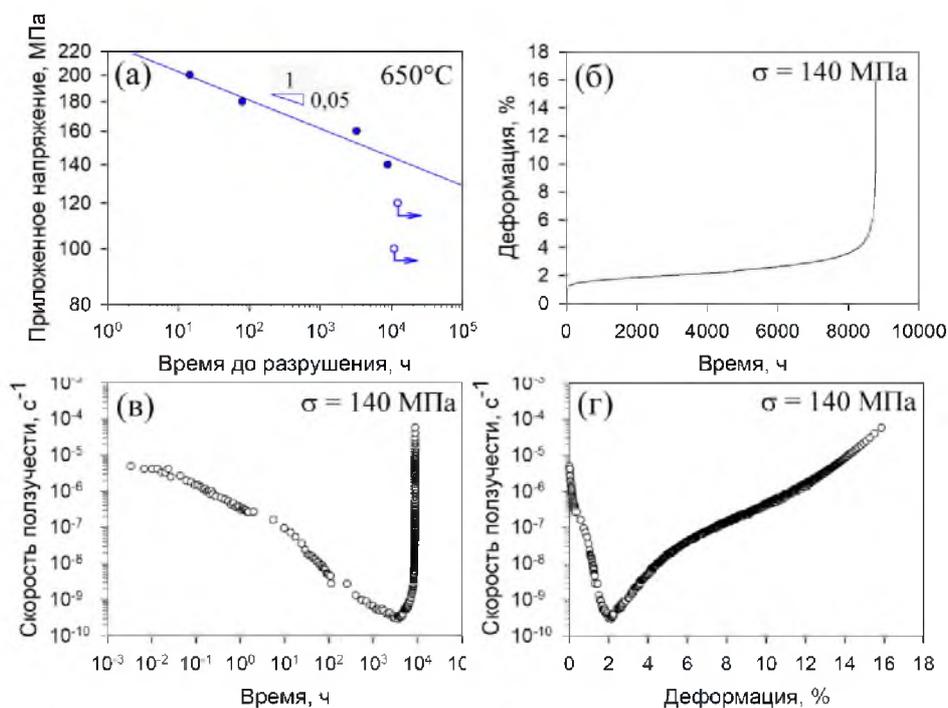


Рис. 1. Зависимости времени до разрушения от приложенного напряжения при 650°C (а), а также зависимости деформации от времени (б), скорости ползучести от времени испытания (в) и скорости ползучести от деформации (г) для испытания 650°C/140 МПа

Из рис. 1 (а) видно, что завершены являются испытания при приложенных напряжениях 200, 180, 160 и 140 МПа. Кривые ползучести в условии 650°C/140 МПа содержат неустановившуюся стадию, скорость ползучести на которой уменьшается до минимума с увеличением времени или деформации, участок, соответствующий достижению минимальной скорости ползучести, и ускоренную стадию ползучести, скорость ползучести на которой увеличивается вплоть до момента разрушения. Время до разрушения в условиях ползучести 650°C/140 МПа составило 8784,8 часов, степень деформации до разрушения 15,9% (рис. 1 (а-в)). Максимальное относительное сужение составило 73%. Минимальная скорость ползучести, соответствующая $2,93 \times 10^{-10} \text{ с}^{-1}$, была достигнута через 3645 часов испытания, деформация, соответствующая минимальной скорости ползучести, составляет 2,12%.

Структурные изменения при ползучести

Структурные изменения исследовались в трех зонах образца после испытания 650°C/140 МПа: (1) захватной части образца, где идет воздействие только температуры без деформации, (2) области равномерной деформации с величиной относительного сужения $\sim 10\%$, (3) в области локализации деформации с величиной относительного сужения $\sim 30\%$.

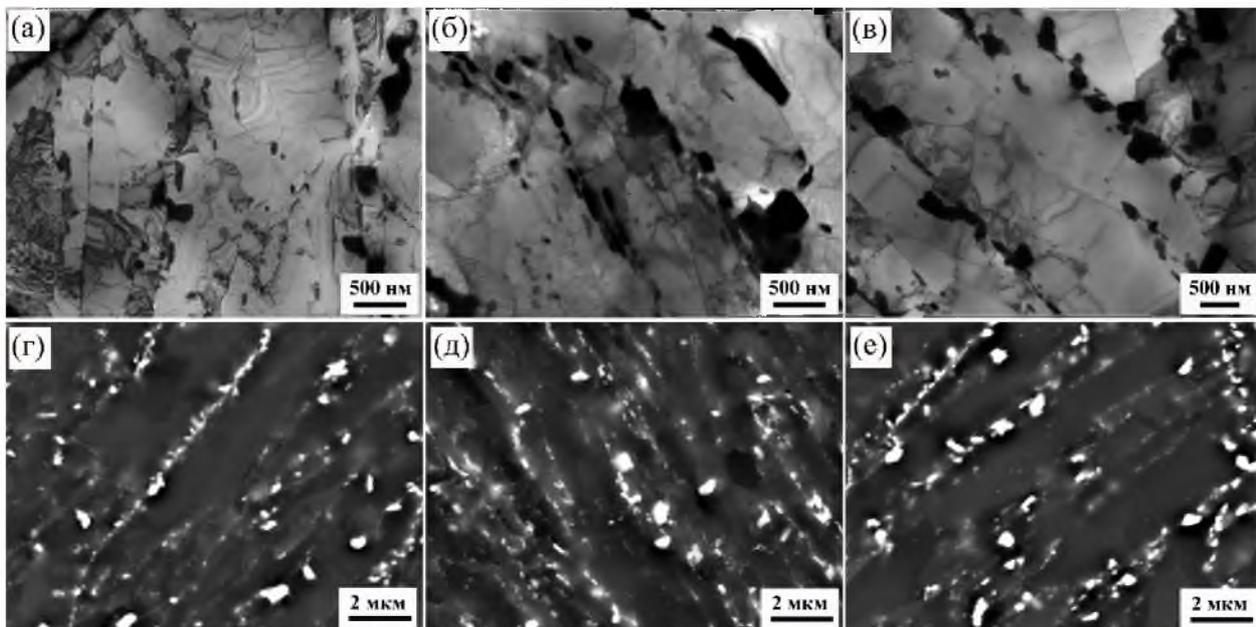


Рис. 2. ПЭМ (а-в) и РЭМ (г-е) изображения реечной структуры исследуемой стали в захватной части образца (а, г), области равномерной деформации (б, д) и области локализации деформации (в, е) после испытания по режиму 650°C /140 МПа

Изображения реечной структуры исследуемой стали в различных частях образца, полученные методами ПЭМ и РЭМ, представлены на рис. 2. На рис. 2 (г-е) частицы фазы Лавеса выглядят как белые частицы, а карбиды $M_{23}C_6$ – как серые частицы. В таблице 1 сведены параметры структуры после термической обработки и после испытаний на ползучесть в различных частях образца.

Таблица 1. Параметры структуры после отпуска и ползучести по режиму 650°C/140 МПа

Часть образца	Исходное состояние	Захватная часть	Область равномерной	Область локализации деформации
Поперечная ширина реек, нм	296	453	676	914
Плотность дислокаций, $\times 10^{14} \text{ м}^{-2}$	2,0	1,1	0,4	0,2
Средний размер $M_{23}C_6$, нм	59	72	83	97
Плотность частиц $M_{23}C_6$ по МУГ, мкм^{-1}	2,56	2,29	1,73	1,42
Средний размер M_6C , нм	44	–	–	–
Средний размер фаз Лавеса, нм	–	183	194	218
Плотность частиц фаз Лавеса по МУГ, мкм^{-1}	–	0,71	1,21	1,15
Средний размер MX , нм	34	31	41	43

Микроструктура исследуемой стали значительно различается в разных частях образца, при этом преимущественно речная структура троостита отпуска сохраняется во всем образце. Увеличение величины деформации привело к уширению мартенситных реек и снижению плотности свободных дислокаций. Так, в захватной части образца ширина реек увеличивается в 1,5 раз, в области равномерной деформации в 2,3 и в области локализации деформации в 3,1 раз по сравнению с исходным состоянием (таблица 1). Плотность свободных дислокаций в захватной части, в области равномерной деформации и в области локализации деформации снижается в 1,75, 4,54 и 10 раз соответственно по сравнению с исходным состоянием (таблица 1). Таким образом, в захватной части образца, где деформация отсутствует, структура близка к исходной структуре, в то время как увеличение деформации стимулирует рост мартенситных реек.

Основным фазовым изменением, происходящим при испытании на ползучесть, является выделение и рост частиц фазы Лавеса, обогащенных вольфрамом и железом. Эта фаза была обнаружена во всех частях образца. Частицы этой фазы выделяются по границам структуры, преимущественно, на высокоугловых границах ИАЗ, блоков и пакетов. Средний химический состав частиц фазы Лавеса представляет собой 55%W-27%Fe-14%Cr-4%(Mo+Co) (в вес.%). Отметим, что средний размер этой фазы несущественно зависит от деформации: в области локализации деформации размер фазы Лавеса всего на 20% больше, чем в захватной части (таблица 1). При этом численные плотности этих частиц по границам мартенситных реек в области равномерной деформации и в области локализации деформации близки и составляют около $1,2 \text{ мкм}^{-1}$. При этом в захватной части образца численная плотность частиц фазы Лавеса, расположенных по малоугловым границам мартенситных реек, составляет всего $0,71 \text{ мкм}^{-1}$. Похожее поведение было обнаружено и после другого режима термической обработки [4].

В захватной части образца размеры карбидов $M_{23}C_6$ и карбонитридов МХ близки к исходным размерам (рис. 2 (а, г), таблица 1). При увеличении деформации наблюдается укрупнение карбидов $M_{23}C_6$, что выражается в увеличении их среднего размера и снижении численной плотности этих частиц по малоугловым границам мартенситных реек, а также карбонитридов МХ. Так, средний размер карбидов $M_{23}C_6$ в области равномерной деформации и области локализации деформации на 41% и 64% соответственно больше, чем в

исходном состоянии (таблица 1). При этом численная плотность частиц $M_{23}C_6$ снижается с $2,56 \text{ мкм}^{-1}$ в исходном состоянии до $1,42 \text{ мкм}^{-1}$ в области локализации деформации (таблица 1). Снижение плотности частиц вдоль малоугловых границ связано с укрупнением частиц и миграцией границ мартенситных реек, в процесс которой часть частиц оказывается внутри реек (таблица 1). Увеличение размеров карбонитридов МХ составило около 25% для областей равномерной деформации и локализации деформации по сравнению с исходным состоянием (таблица 1). Аналогичное поведение частиц МХ было ранее обнаружено в стали Р92 при сопоставимом времени испытания [7].

Фрактография

На рис. 3 представлен излом разрушенного образца на ползучесть в условиях $650^\circ\text{C}/140 \text{ МПа}$. Тип разрушения является транскристаллитным, представленным множеством вязких ямок различного диапазона размеров. При данном типе разрушения множество мелких ямок могут объединяться в единичные довольно крупные ямки. На дне некоторых крупных ямок наблюдались крупные частицы размером порядка $1,9 \text{ мкм}$, которые являлись центрами зарождения обнаруженных ямок.

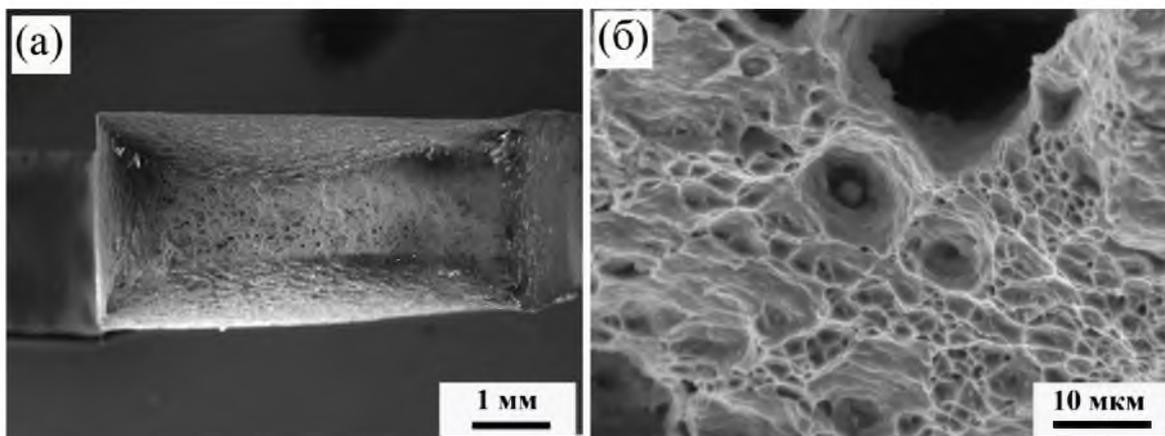


Рис. 3 Изображение излома разрушенного образца на ползучесть в условиях $650^\circ\text{C}/140 \text{ МПа}$, снятого во вторичных электронах РЭМ.

Выводы

Локализация пластической деформации при ползучести оказывает значительное влияние на структурные изменения при ползучести в исследуемой стали. Увеличение величины пластической деформации приводит к существенному увеличению ширины реек с одновременным снижением плотности свободных дислокаций, что

коррелирует с укрупнением частиц карбида $M_{23}C_6$ и образованием сравнительно крупных частиц фазы Лавеса.

Результаты исследований получены за счет средств гранта РФФИ № 20-33-90117. Работа выполнена с использованием Центра коллективного пользования «Технологии и материалы НИУ «БелГУ»

Литература

1. Viswanathan, R., Bakker, W. (2001). Materials for ultrasupercritical coal power plants –Turbine materials: Part II. Journal of Materials Engineering and Performance, 10(1), 96-101.
2. Abe, F. (2008). Precipitate design for creep strengthening of 9% Cr tempered martensitic steel for ultra-supercritical power plants. Science and Technology of advanced materials, 9(1), 013002.
3. Dudova, N., Mishnev, R., Kaibyshev, R. (2019). Creep behavior of a 10% Cr heat-resistant martensitic steel with low nitrogen and high boron contents at 650 C. Materials Science and Engineering: A, 766, 138353.
4. Fedoseeva, A., Nikitin, I., Dudova, N., Kaibyshev, R. (2021). Coarsening of Laves phase and creep behaviour of a Re-containing 10% Cr-3% Co-3% W steel. Materials Science and Engineering: A, 812, 141137.
5. Abe, F. (2005). Effect of fine precipitation and subsequent coarsening of Fe₂W Laves phase on the creep deformation behavior of tempered martensitic 9Cr-W steels. Metallurgical and materials Transactions A, 36(2), 321-332.
6. Abe, F., & Nakazawa, S. (1992). The effect of tungsten on creep. Metallurgical Transactions A, 23(11), 3025-3034.
7. Никитин, И. С., Федосеева, А. Э. (2016). Влияние пластической деформации на структурные изменения в стали 10X9B2MФБР в процессе ползучести. XVII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых. Ч. 1. – Екатеринбург, 2016, 1(17), 156-160.