

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ СО РАН

ФИЗИЧЕСКАЯ МЕЗОМЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ.
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ
СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЗМЫ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Международная конференция

5–8 сентября 2022 г.
Томск, Россия

Тезисы докладов

Новосибирск
2022

ВЛИЯНИЕ ВЫДЕРЖКИ В ПРОТОЧНОМ СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-823^{1,2}Линник В.В., ¹Полехина Н.А., ^{1,2}Литовченко И.Ю., ¹Алмаева К.В., ¹Аккузин С.А.¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

В настоящее время для ядерных реакторов нового поколения во всем мире разрабатываются технологии жидкометаллических теплоносителей на основе тяжелых металлов [1–3]. Основными достоинствами таких теплоносителей являются термическая устойчивость, низкая активизируемость и высокая радиационная стойкость [3]. 9 – 12 %-ные ферритно-мартенситные стали рассматриваются как перспективные конструкционные материалы оболочек тепловыделяющих элементов проектируемых ядерных реакторов [4–5]. При использовании жидких металлов в качестве теплоносителей существуют трудности, связанные с их высокой агрессивностью по отношению к сталям, проявляющиеся в формировании оксидных слоев, изменениях микроструктуры поверхности и свойств материалов, а также в возможности их разрушения [3].

В настоящей работе проведено сравнительное фрактографическое исследование изломов образцов российской ферритно-мартенситной стали ЭП-823 (Fe-12Cr-Mo-W-Si-V-W-Nb), разрушенных в процессе испытаний на растяжение при 20 °С и 700 °С после длительного (1000 ч) контакта с проточным теплоносителем (концентрация кислорода $\approx (4 - 8) \times 10^{-7}$ масс. %) при $T = 580$ °С в сравнении с состаренными образцами, а также электронно-микроскопические исследования деформированной микроструктуры стали в области шейки образцов, растянутых при различных температурах. Сталь ЭП-823 выбрана в качестве одного из основных конструкционных материалов активной зоны инновационного реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300.

Фрактографические исследования показали, что наличие коррозионной среды не оказывает существенного влияния на вид изломов стали как при комнатной, так и при повышенной температурах испытаний. Разрушение образцов стали ЭП-823 характеризуется значительной макролокализацией деформации с формированием шейки и развитым рельефом поверхности разрушения. При этом практически всю поверхность излома занимает радиальная зона распространения трещины, зона среза практически не визуализируется, особенно при высокой температуре испытаний. При температуре растяжения 700 °С относительное сужение в шейке значительно увеличивается.

Разрушение стали происходит по механизму вязкого ямочного (чашечного) излома, следов хрупкого разрушения квазисколом не обнаружено.

При 700 °С изменение характера разрушения заключается в увеличении размера ямок вязкого разрушения. Размеры ямок при 700 °С достигают 12 мкм, при 20 °С они значительно меньше и составляют 1 – 4 мкм. На дне ямок обнаруживаются частицы вторых фаз, которые являются карбонитридами, преимущественно на основе Мо. Такие частицы служат концентраторами напряжений и являются преимущественными местами зарождения крупных микропор.

Результаты исследований деформированной микроструктуры стали ЭП-823 в области шейки методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что особенности сформированной при пластической деформации микроструктуры образцов определяются главным образом процессами отпуска ферритно-мартенситной структуры при термическом воздействии, а также температурой растяжения. При этом отличий между деформированной микроструктурой образцов с выдержкой и без выдержки в теплоносителе не обнаружено.

При комнатной температуре в области шейки образцов в результате пластической деформации происходит искривление мартенситных ламелей, а также фрагментация пластин мартенсита с формированием новых малоугловых границ разориентации. Ширина

мартенситных ламелей при этом составляет $\approx 100 - 500$ нм, плотность дислокаций достигает значений $\rho \approx 10^{11}$ см⁻². В микроструктуре обнаружены карбиды M₂₃C₆ (преимущественно на основе хрома и марганца) размерами от 50 до 200 нм, а также мелко- и грубодисперсные частицы карбонитридов типа MX (где M – Nb, Mo, V; X – C, O, N) преимущественно на основе ниобия.

Повышенная температура деформации (700 °С) сопровождается развитием процессов динамической полигонизации и начальных стадий динамической рекристаллизации. В микроструктуре формируются зерна феррита размерами от 200 нм до нескольких микрометров. Плотность дислокаций значительно ниже таковой после деформации при 20 °С и составляет $\rho \approx 10^{10}$ см⁻². После деформации при 700 °С увеличивается объемная доля грубодисперсных карбидов M₂₃C₆, по сравнению с растяжением при комнатной температуре. Размеры таких частиц могут достигать 500 нм. Также обнаружено увеличение плотности и размеров мелкодисперсных частиц типа MX.

Таким образом, наличие коррозионной среды (жидкого свинца) не оказывает заметного влияния на вид изломов стали как при комнатной, так и при повышенной температуре испытаний T = 700 °С – в интервале температур предполагаемой эксплуатации материала внутри активной зоны реактора. Наиболее значительные различия в изломах и в деформированной микроструктуре наблюдаются в зависимости от температуры растяжения (20 и 700 °С). Высокая температура старения также оказывает влияние на деформированную микроструктуру стали, способствуя активизации процессов отпуска ферритно-мартенситной структуры и выделения дисперсных частиц. Охрупчивающего влияния теплоносителя не обнаружено.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН № FWRW-2021-0008 и при поддержке гранта РФФИ №19-48-700020 p_a и Администрации Томской области.

1. Kurata Y., Futakawa M., Saito S. Comparison of the corrosion behavior of austenitic and ferritic/martensitic steels exposed to static liquid Pb–Bi at 450 and 550 °C // Journal of Nuclear Materials. 2005. Vol. 343. P. 333–340.
2. Бутаков Д.С., Голосов О.А., Николкин В.Н., Барыбин А.В., Хвостов С.С. Методический подход при исследовании массопереноса продуктов коррозии сталей в расплавленном свинце // Вестник ДИТИ. Физика и техника ядерных реакторов. 2019. № 1(18). С. 22–28.
3. Красин В. П., Крылова Е. В., Музыка А. Ю. Жидкометаллические теплоносители с точки зрения их совместимости с конструкционными материалами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 3. С. 77 – 82
4. Tan L., Hoelzer D.T., Busby J.T., Sokolov M.A., Klueh R.L. Microstructure control for high strength 9 % Cr ferritic-martensitic steels // Journal of Nuclear Materials. 2012. V. 422. P. 45–50.
5. Polekhina N.A., Litovchenko I.Y., Tyumentsev A.N., Kravchenko D.A., Chernov V.M., Leontyeva-Smirnova M.V. Effect of high-temperature thermomechanical treatment in the austenite region on microstructure and mechanical properties of low-activated 12% chromium ferritic-martensitic steel EK-181 // Technical Physics. 2017. Vol. 62. № 5. P. 736–740.