

Деградация свойств и структуры сварных соединений трубопроводов реакторов ВВЭР-440 при термическом и термодеформационном старении в условиях длительной эксплуатации

Е. И. Мамаева^а, М. Б. Бакиров^б, И. М. Рафалович^а, А. Е. Корнеев^а,
А. Г. Мазепа^а, И. Л. Харина^а, Е. К. Смирнова^а, О. А. Федорова^а

^а ЦНИИТМАШ, Москва, Россия

^б ВНИИАЭС, Москва, Россия

Исследуется характер изменения свойств и структуры металла сварного соединения трубопровода ВВЭР-440 при термическом и термодеформационном старении в условиях длительной эксплуатации (сверх 100 тыс. ч). Для циклического нагружения в области сварного шва установлена зависимость динамики структурных изменений металла от исходного уровня упругопластических деформаций в зоне термического влияния.

Ключевые слова: трубопровод, термическое и термодеформационное старение, структура, свойства сварных соединений.

В настоящей работе исследовалось влияние длительной эксплуатации, термического (ТС) и термодеформационного старения (ТДС) на структуру и свойства сварных соединений трубопроводов Ду 500 ГЦК ВВЭР-440 НВ АЭС после 100 тыс. ч эксплуатации. Для прогнозирования изменения свойств при дальнейшей эксплуатации проводили термическое старение при 450°C в течение 1500 ч, что для металла шва с содержанием феррита до 8% ориентировочно эквивалентно повреждаемости при 280°C, 250 тыс. ч [1]; часть образцов подвергали старению при 450°C, 3000 ч.

Образцы в виде колец ($D = 30$ мм, $d = 12$ и 24 мм, толщина $h = 5$ мм), подвергали термодеформационному старению. Образцы вырезали таким образом, чтобы линия сплавления находилась в диаметральной плоскости. При этом одна половина образца состояла из основного металла, другая – из металла шва. Часть образцов имела вставки из стали 08X18H12T, что обеспечивало заданный натяг колец при условии упругого или упругопластического деформирования металла [2]. Образцы подвергали различному воздействию: ТС при 450°C, 520 ч и при 500°C, 1000 ч; ТС + статическое нагружение; ТС + циклическое нагружение; ТС + совместное статическое и циклическое нагружение.

Определение механических свойств при растяжении металла сварных соединений трубопровода показало, что прочностные свойства (σ_B и $\sigma_{0.2}$) основного металла и металла шва в результате эксплуатации и дополнительного старения могут как несколько повышаться, так и не изменяться [3]. Пластические свойства (δ , ψ) после эксплуатации и старения в основном понизились, особенно для металла шва (до 15...20%).

Измерение твердости основного металла и металла шва с последующим анализом представительности выборок и статистической обработкой данных свидетельствует, что в большинстве случаев она не изменяется после старения. Изменения были выявлены в образце 08 при одновременном терми-

ческом и циклическом воздействии ($T = 500^\circ\text{C}$, 1000 ч; $\Delta\sigma_{\text{цикл}} = -30$ МПа) и в образцах 26, 36 ($T = 500^\circ\text{C}$, 1000 ч) и 37 ($T = 450^\circ\text{C}$, 520 ч) при одновременном термическом, статическом и циклическом воздействии (26 – $\sigma_k = 75$ МПа; 36, 37 – $\sigma_k = 120$ МПа; 26, 36, 37 – $\Delta\sigma_{\text{цикл}} = -15$ МПа). В условиях статического и циклического упругопластического деформирования упрочнение основного металла составляло 153...165 НВ. В области упругих деформаций твердость понижалась, для металла шва с 194 до 169 НВ.

Испытания на ударный изгиб образцов размером $10 \times 10 \times 55$ мм с V-образным надрезом показали, что длительная эксплуатация (Э) и ТС при 450°C в течение 1500 ч не оказали повреждающего влияния на ударную вязкость стали 08X18H12T. В то же время для металла шва установлено заметное снижение ударной вязкости после эксплуатации на 20% при 20°C и после ТС при 450°C , 1500 ч еще на 22...34% во всем исследованном диапазоне температур. Полученные ранее [3] и в работе [4] данные свидетельствуют, что закономерности влияния эксплуатации и ТС на ударную вязкость основного металла (ОМ) и металла шва (Ш) сталей 08X18H12T и 304 одинаковые (рис. 1).

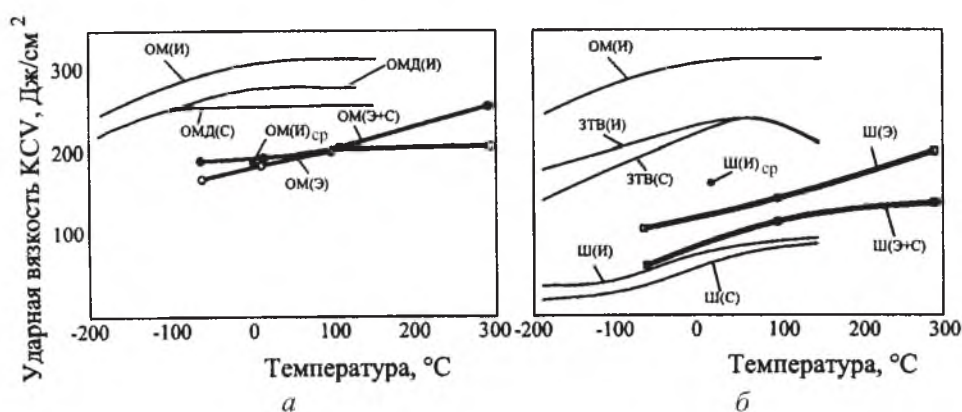


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) данные влияния эксплуатации и ТС на ударную вязкость основного металла (а), металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) (б) сталей 08X18H12T (штриховые линии) и 304 [4] (сплошные линии): И – исходное состояние, С – после старения, Э+С – ТС, Д – предварительная деформация на 3%.

Определение пластической вязкости разрушения металла шва при 20 и 290°C с построением $J - R$ -кривых проводили на компактных образцах СТ-1Т [3].

Величина J_{1c} для металла шва после эксплуатации, определенная при температуре 290°C , составила 92 кН/м (рис. 2). Термическое старение при 450°C , 1500 ч уменьшило ее более чем в два раза: с ~ 92 кН/м до 42 кН/м. Для металла шва стали 304 [4] значения J_{1c} уменьшились также на $\sim 50\%$ при старении.

Результаты испытаний на малоцикловую усталость при $R_e = -1$, $f = 0,4...2,0$ Гц показали, что при заданной амплитуде деформации $\varepsilon_a = 0,4\%$

число циклов до зарождения трещины для стали 08Х18Н12Т в исходном состоянии составило 6400 цикл, после эксплуатации – 6200 цикл, после ТС – 5600 цикл; для металла шва соответственно – 12000 и 4000 цикл.

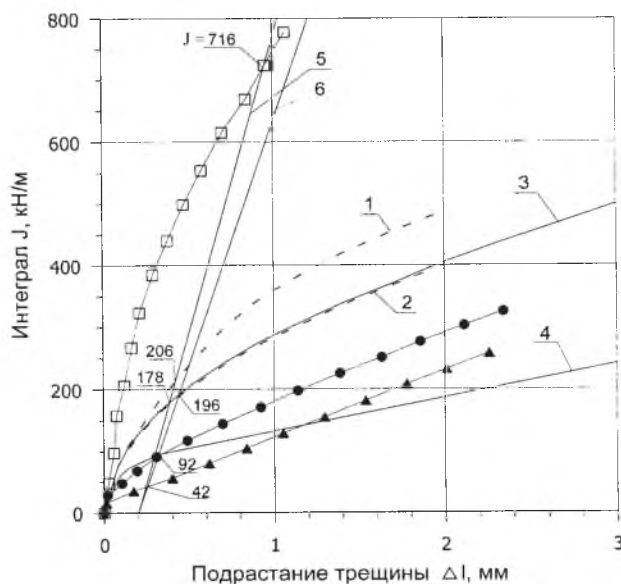


Рис. 2. $J-R$ -кривые металла сварного шва трубопровода Ду 500: \square – $T = 20^\circ\text{C}$, сталь 08Х18Н12Т (\ominus); \bullet , \blacktriangle – $T = 290^\circ\text{C}$, металл шва (\ominus) и ТС ($I-4$ – металл шва стали 304 [4]); 1, 2 – исходное состояние; 3, 4 – после ТС; 1, 3 – $T = 0^\circ\text{C}$; 2, 4 – $T = 289^\circ\text{C}$; 5, 6 – линии, отстоящие на 0,2 мм от линии вытягивания).

Испытания на циклическую трещиностойкость при осевом растяжении ($T = 20^\circ\text{C}$, $R = 0$, $f = 20$ Гц) свидетельствуют о повышении скорости роста трещин в стали 08Х18Н12Т и в металле шва после эксплуатации и ТС в основном при низких значениях $\Delta K = 13...20$ МПа $\sqrt{\text{м}}$ в 1,5–2 раза. Значения ΔK_{th} для металла шва в исходном состоянии и после эксплуатации составили соответственно 5,6 и 4,8 МПа $\sqrt{\text{м}}$, что говорит о возможности развития трещин в случае эксплуатации при более низких значениях ΔK , чем в исходном состоянии.

Сравнительные испытания на стойкость против коррозионного растрескивания (КР), которые проводили на U-образных образцах, нагруженных по методу постоянной деформации при $\sigma \geq \sigma_{0,2}$ (ОСТ 108.901.01-79), показали, что основной металл, металл шва и околошовной зоны (ОШЗ) после 100 тыс. ч наработки и после ТС проявляют одинаковую склонность к хлоридному КР при испытании в растворе MgCl_2 , кипящем при 116°C .

Результаты испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии (МКК) по методу АМ (ГОСТ 6032-89) показали, что металл шва, зоны термического влияния и линии сплавления после 100 тыс. ч эксплуатации не проявляют склонности к МКК, однако для них характерно наличие отдельных деформационных трещин после загиба на угол 90° . Испытания после ТС при 450°C , 1500 ч по методу АМ при загибе образца выявили наличие

множественных деформационных трещин в металле шва, в том числе в корне шва, и по линии сплавления. Полученные результаты позволяют заключить, что ТС приводит к охрупчиванию металла шва, которое вызывает повышенную растворимость отдельных локальных зон металла при кипячении в растворе АМ и способствует образованию трещин.

Исследование содержания ферромагнитной фазы (СФФ) с помощью ферритометра “Ферстер” локального типа показало ее неравномерное распределение в металле шва, возрастающее от корня шва к его верхней части. Термическое старение при 450°C в течение 1500 и 3000 ч по сравнению с состоянием после эксплуатации привело к уменьшению СФФ в верхней части шва с 3,2 до 2,6 и 1,3%, в средней части – с 2,0 до 1,8 и 1,2% и в нижней – с 1,9 до 1,8 и 0,8%. Как видно из рис. 3, СФФ после ТДС ниже, чем после ТС.



Рис. 3. Содержание ферромагнитной фазы в металле шва после эксплуатации, ТС и ТДС: а – Э; б – ТС при 450°C, 520 ч; в – ТС при 450°C, 3000 ч и ТДС при 450°C, 520 ч ($I - \sigma_k = 0$, $\Delta\sigma_{\text{цикл}} = 0$; 2 – $\sigma_k = 0$, $\Delta\sigma_{\text{цикл}} = -15$ МПа; 3 – $\sigma_k = 75$ МПа, $\Delta\sigma_{\text{цикл}} = 0$; 4 – $\sigma_k = 75$ МПа, $\Delta\sigma_{\text{цикл}} = -15$ МПа; 5 – $\sigma_k = 120$ МПа, $\Delta\sigma_{\text{цикл}} = 0$; 6 – $\sigma_k = 120$ МПа, $\Delta\sigma_{\text{цикл}} = -15$ МПа).

Представленные выше результаты влияния длительной эксплуатации, ТС и ТДС на свойства стали свидетельствуют о необходимости обнаружения обусловивших их структурных изменений. Термическое старение при 450°C, 1500 ч оказало существенное влияние на фазовый состав металла шва. Произошел распад δ -феррита по типу $\delta \rightarrow \alpha + \alpha'$ с образованием обогащенной железом α -фазы и хромом высокодисперсной α' -фазы, имеющей высокую твердость, и выделением значительного количества карбидов хрома $M_{23}C_6$ (рис. 4). Термическое старение продолжительностью 3000 ч интенсифицировало процесс распада δ -феррита с образованием α' -фазы и выделением карбидов $M_{23}C_6$ – рис. 4, в и 5, а, б, что подтверждается также результатами определения СФФ.

Термическое старение привело к более интенсивному выделению карбидной фазы по границам зерен в узкой околошовной зоне, что было выявлено специальным травлением. Методом электронной микроскопии установлены морфология и природа карбидов, среди которых преобладал $M_{23}C_6$.

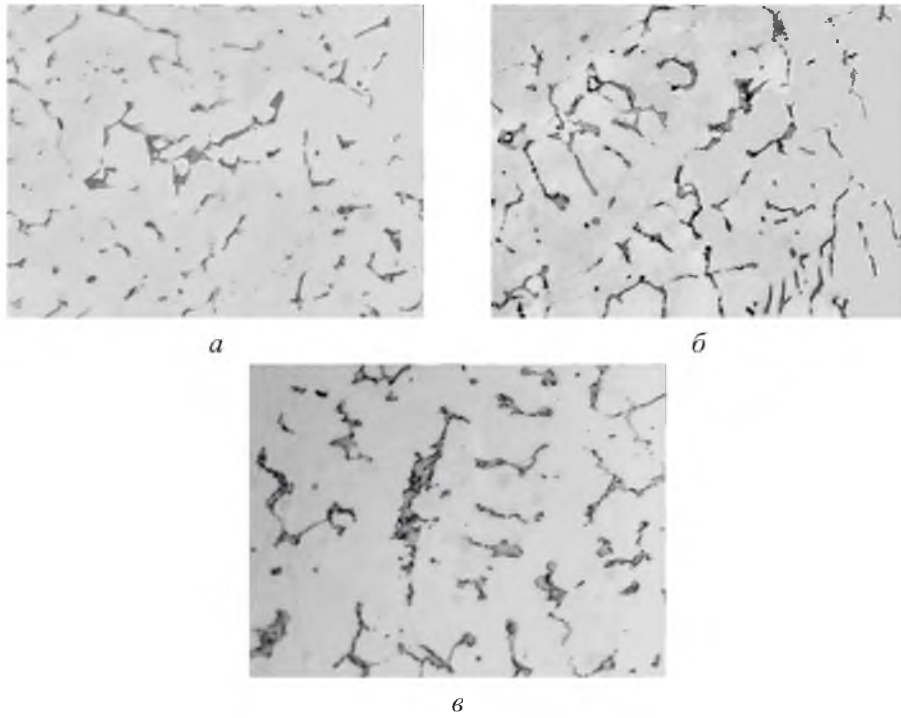


Рис. 4. Влияние дополнительного термического старения на распад δ -феррита в металле шва сварного соединения трубопровода Ду 500: а – после эксплуатации; б, в – после ТС при 450°C, 1500 и 3000 ч ($\times 1000$).

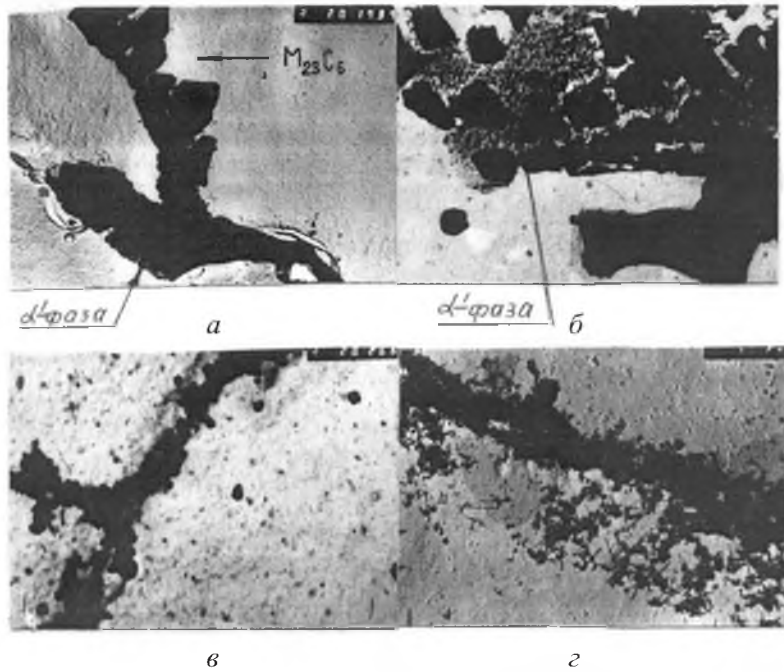


Рис. 5. Микроструктура металла шва (а, б) и околошовной зоны (в, г) после старения: а – ТС при 450°C, 1500 ч; б, в – ТС при 1500°C, 3000 ч; г – ТДС при 500°C, 500 ч, $\sigma_k = 120$ МПа, $\Delta\sigma_{\text{цикл}} = -15$ МПа (а, в – $\times 20000$; б – $\times 17000$; г – $\times 5000$).

В наибольшей степени этот процесс протекал в прикорневой зоне. Интенсивность процесса, ширина и протяженность (по высоте шва) зоны выпадения карбидов возрастали с увеличением продолжительности старения (рис. 5,в). Исходный уровень упругопластических деформаций и циклическое нагружение при повышенных температурах оказали заметное влияние на динамику структурных изменений в зоне термического влияния (рис. 5,г).

Выводы

1. Установлено, что наиболее опасным проявлением деградации свойств сварных соединений трубопроводов Ду 500 ВВЭР-440 при эксплуатации может быть охрупчивание металла шва, что было определено по снижению значений ударной и пластической вязкости разрушения, а также по образованию деформационных трещин в металле шва и по линии сплавления при испытании на стойкость против МКК.

2. Выявленная деградация свойств металла шва и ЗТВ в результате эксплуатации и старения обусловлена структурными изменениями вследствие распада δ -феррита с образованием α' -фазы и выделением карбидов хрома $M_{23}C_6$ для металла шва и выпадения карбидов по границам зерен при старении для металла ОШЗ, что может способствовать развитию процесса КР.

3. Динамика структурных изменений металла сварных соединений трубопроводов Ду 500 определяется как температурно-временным режимом старения, так и исходным напряженно-деформированным состоянием материала и наличием циклического нагружения.

Резюме

Досліджується характер зміни властивостей і структури металу зварного з'єднання трубопроводу ВВЕР-440 при термічному і термомодеформаційному старінні в умовах тривалої експлуатації (більш як 100 тис. год). Для циклічного навантаження в області зварного шва встановлено залежність динаміки структурних змін від початкового рівня пружнопластичних деформацій в зоні термічного впливу.

1. *Trautwein A. and Gysel W.* Influence of long-time aging of CF8 and CF8M cast steel at temperatures between 300 and 500°C on impact toughness and structural properties // ASTM STP 756. – 1982. – P. 165 – 189.
2. *Рафалович И. М., Мамаева Е. И., Бакиров М. Б. и др.* Исследование изменений свойств и микроструктуры материала сварного соединения аустенитного трубопровода при термическом и термомодеформационном старении: Тр. VII Междунар. конф. “Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”. – СПб., 2002. – Т. 2. – С. 128 – 138.
3. *Мамаева Е. И., Бакиров М. Б., Кабелевский М. Г. и др.* Исследование деградации свойств и структуры сварных соединений трубопроводов

ГЦК ВВЭР-440 в результате длительной эксплуатации и дополнительного термического старения: Тр. VII Междунар. конф. "Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС". – СПб., 2002. – Т. 2. – С. 215 – 226.

4. *Asano M., Hattori S., Suzuki I., et al.* Effect of long-term thermal aging on the material properties of austenitic stainless steel welded joints // ICONE-4. – ASME. – 1996. – 5. – P. 183 – 188.

Поступила 28. 05. 2003