

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕННОГО ФАКТОРА НА МИКРОСТРУКТУРУ СТАЛИ 08X18H10T, ОТРАБОТАВШЕЙ 150000 Ч

*В.В. Брык, А.С. Кальченко, Л.С. Ожигов, В.И. Савченко
ИФТТМТ ННЦ ХФТИ, г. Харьков*

Представлены результаты исследования физико-механических свойств аустенитной хромоникелевой нержавеющей стали 08X18H10T крышки парогенератора энергоблока №1 Ровенской АЭС после 145,8 тыс. ч эксплуатации. Выявлена анизотропия механических свойств в образцах, вырезанных в продольном и поперечном направлениях относительно рабочей поверхности металла. С помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) изучены фрактографии изломов образцов, испытанных на ударный изгиб. Методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследована структура металла.

1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации АЭС периодически проводится контроль механических свойств металла разных конструкций разрушающими и (или) неразрушающими методами согласно правилам по безопасной эксплуатации атомных энергетических установок [1].

Одним из методов контроля механических свойств металла оборудования АЭС после длительной эксплуатации является вырезка и исследование трепанов [2]. Положительными сторонами контроля механических свойств с помощью вырезок являются: исследование реального металла (а не образцов-свидетелей); прямые методы исследования механических свойств на стандартных образцах (механические свойства определяются при любой требуемой температуре).

Сбор и рассмотрение информации о состоянии оборудования позволяет заблаговременно предусматривать мероприятия, исключая его чрезвычайный износ, и тем самым гарантировать возможность использования сверх нормативного срока.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Вырезка образцов для исследования осуществлялась при помощи мобильной электроискровой установки «Микрорез-3». Для резания использовался искровой импульсный разряд в диэлектрической рабочей жидкости. Схема разделки заготовки, вырезанной из крышки парогенератора, приведена на рис. 1.

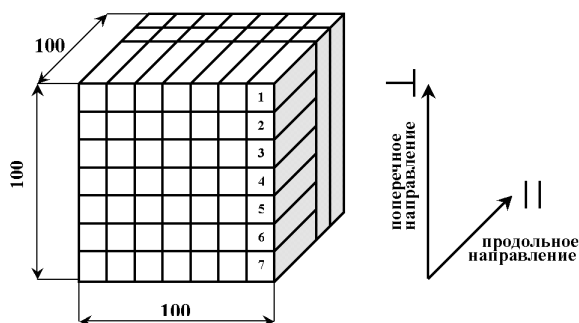


Рис. 1. Схема разделки заготовки на образцы

Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине 1246P-2/2300. Испытания проведены на воздухе при комнатной температуре и при 350°C в вакууме. Для этого были изготовлены следующие образцы:

- стандартные цилиндрические пятикратные образцы диаметром 4 мм (ГОСТ 1497-84) [3];
- стандартные плоские пятикратные образцы толщиной 3 мм (ГОСТ 1497-84);
- плоские пятикратные микрообразцы толщиной 1 и 2 мм.

Цилиндрические образцы изготовлены на токарном станке. Заготовки под плоские образцы шлифовали на плоскошлифовальном станке до требуемой толщины, а затем на фрезерном станке были изготовлены образцы требуемых размеров.

Для испытаний на ударный изгиб использовали маятниковый копёр ПСВ-30. Испытания проводили при комнатной температуре. Образцы для определения ударной вязкости были изготовлены в соответствии с ГОСТ 9454-78 [4] (образцы с V-образным концентратором, тип 11, 14). Также были изготовлены микрообразцы, отличающиеся от типа 14 толщиной (вместо 2 толщина 1 мм).

Электронно-микроскопические исследования структуры образцов проводились на электронном аналитическом микроскопе JEM-100CX, оборудованном гониометром бокового типа. Образцы были вырезаны из исходного материала размером 10x20x0,5 мм. Затем они подвергались механической шлифовке до толщины ~200 мкм. Шлифовка производилась на мелкой наждачной бумаге с целью уменьшения наклёпанного приповерхностного слоя до ~20 мкм. Из фольги при помощи пуансона вырубались диски диаметром 3 мм. Окончательное утонение образцов производилось в установке типа «Jet-electropolish» методом струйной электрополировки до появления в полируемом образце отверстия [5, 6].

Изучение поверхности излома образцов (фрактография) проводилось на том же микроскопе при помощи растровой приставки ASID-4D. Образцы для исследования поверхности излома были вырезаны из образчиков с концентратором после испытаний на ударную вязкость. Из разрушенного образца сде-

ляли вырезку в 2...3 мм от поверхности разлома. Это было предпринято с той целью, чтобы поместить образчик на держатель образцов электронного микроскопа, и связано только с конструкцией данного микроскопа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В качестве исследуемого материала в данной работе применялись образцы стали 08X18H10T, вырезанные из крышки парогенератора (наработка 145800 ч) энергоблока №1 Ровенской АЭС. Состав исходной стали приведен в табл.1 [7].

Таблица 1

Состав исходной стали

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P
0,08	0,8	1,5	17,9	10,2	0,5	0,02	0,035

В перечень контролируемых механических свойств металла, в частности крышки парогенератора, включаются:

- предел прочности (σ_m^{+20} , σ_m^{+350});
- предел текучести ($\sigma_{0,2}^{+20}$, $\sigma_{0,2}^{+350}$);
- относительное удлинение (δ^{+20} , δ^{+350});
- относительное сужение (ψ^{+20} , ψ^{+350});
- ударная вязкость (KCV при T=20°C).

Известно, что после термической обработки или эксплуатации в сложных полях температуры, вибраций, напряжений состояния физико-механических свойств толстостенных изделий могут быть неоднородными по толщине. Для выяснения этого обстоятельства были проведены исследования механических свойств и ударной вязкости по толщине крышки. В табл. 2 и 3 приведены результаты определения механических свойств при температуре испытаний 20 и 350°C соответственно, а в табл.4 – ударной вязкости по толщине крышки.

Таблица 2

Механические свойства металла по толщине крышки парогенератора энергоблока № 1 РАЭС после 145,8 тыс. ч эксплуатации T_{исп} = 20°C

Маркировка	σ_m , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	ψ , %
среднее значение	59,4±1,0	26,4±0,4	72,8±2,4	74,3±2,2
среднее значение ⊥	57,5±1,0	26,6±0,4	52,5±2,4	56,7±2,2
ТУ 0714E051 (не менее)	50,0	20,0	37,0	55,0

Таблица 3

Механические свойства металла по толщине крышки парогенератора энергоблока № 1 РАЭС после 145,8 тыс. ч эксплуатации T_{исп} = 350°C

Маркировка	σ_m , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	ψ , %
среднее значение	38,7±1,0	18,6±0,4	39,5±2,4	71,8±2,2
среднее значение ⊥	37,7±1,0	20,0±0,4	34,0±2,4	46,5±2,2
ТУ 0714E051 (не менее)	36,0	17,0	23,0	45,0

Таблица 4

Ударная вязкость металла крышки парогенератора энергоблока № 1 РАЭС после 145,8 тыс. ч эксплуатации

Маркировка	Ударная вязкость KCV, кгс м/см ²	Примечание
среднее значение	26,3±0,2	Надрез со стороны рабочей поверхности
среднее значение	26,0±0,2	Надрез со стороны, противоположной рабочей поверхности
среднее значение ⊥	11,7±0,2	-
ТУ 0714E051 (не менее)	10	-

Из приведенных данных в табл.2, 3, 4 видно, что механические свойства по толщине крышки в продольном и поперечном направлениях значительно отличаются, а именно: прочность примерно одинакова, но пластичность и ударная вязкость отличаются в 1,5 и 2,5 раза соответственно. Из табл. 4 видно, что у образцов, вырезанных в продольном направлении с расположением надреза как со стороны рабочей поверхности, так и с противоположной стороны, ударная вязкость близка.

Исследование поверхности излома (фрактография) показало, что образцы, вырезанные в продольном направлении трепана крышки парогенератора (рис.2), имеют ямочную структуру излома, характерную для вязкого разрушения материала в теле и по границе зерна.

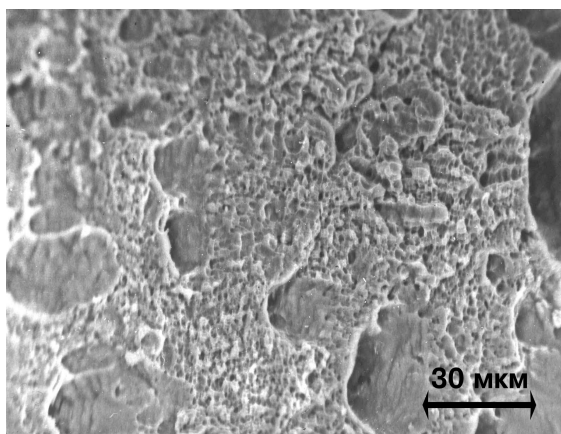


Рис.2. Структура поверхности разрушения образца, вырезанного в продольном направлении трепана

Образцы же, вырезанные в поперечном направлении (там, где трещина распространяется в плоскости крышки парогенератора), в основном имеют ту же волокнистую структуру излома, однако обнаружено некоторое число зёрен, внутри которых наблюдается кристаллическая составляющая излома (рис.3), что свидетельствует о смешанном характере разрушения. На этих участках наблюдаются микротрещины, не распространяющиеся за пределы хрупкого участка. Локализации в распространении трещин способствует высокая пластичность границ зёрен.

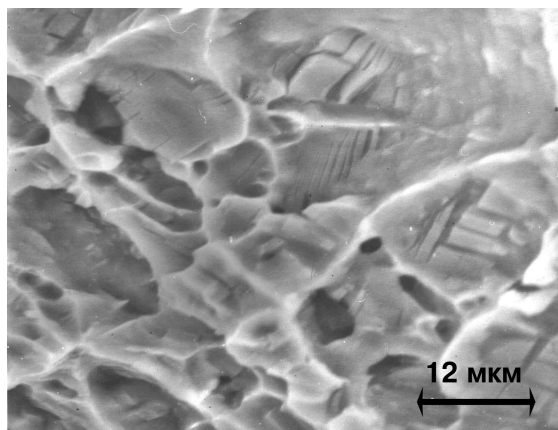


Рис.3. Структура поверхности разрушения образца, вырезанного в поперечном направлении трепана

Причина различия в характере разрушения в продольных и поперечных образцах совсем не очевидна и для её объяснения необходимо знание микроструктуры образцов. С этой целью были приготовлены и исследованы образцы на электронном микроскопе в просвечивающем режиме.

При исследовании структуры стали на просвет особенностей в зёрненной её структуре и в распределении карбидных фаз не было выявлено. В обоих видах образцов наблюдаются дислокации, плотность которых примерно равна и составляет 10^9 см^{-2} . Наблюдаются как расщепленные, так и полные дислокации, что характерно для данной стали. Однако число дефектов упаковки в образцах, вырезанных в продольном направлении, заметно больше (рис.4).

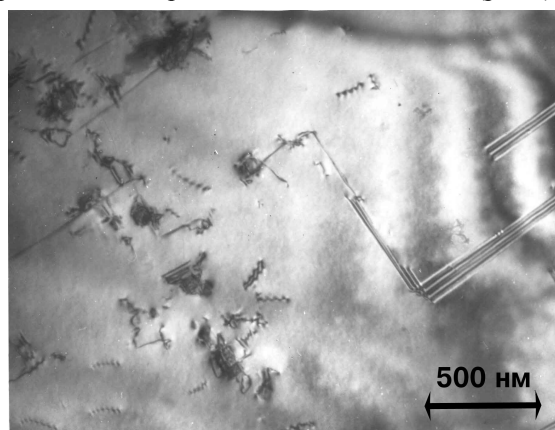


Рис.4. Дефекты упаковки

Помимо этого в продольной плоскости распространения трещины в месте локальной деформации был обнаружен мартенсит (рис.5).

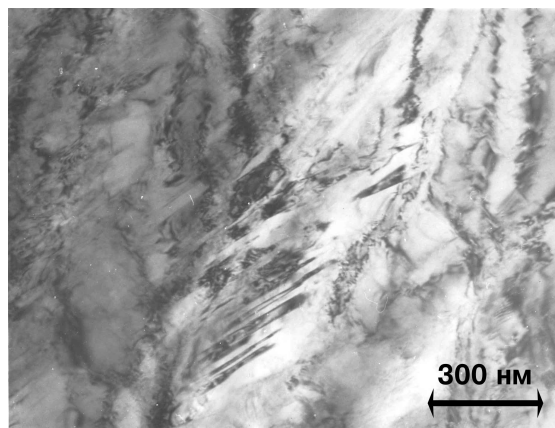


Рис.5. Мартенситная структура в деформированном материале

В результате анализа полученных данных был сделан вывод о том, что в процессе эксплуатации крышка парогенератора подвергается сложному действию напряжений. Тангенциальная составляющая напряжений, действуя на дислокацию, расщепляет её, что способствует повышению плотности дефектов упаковки в данном направлении.

При распространении трещины дефекты упаковки с сегрегированной на них примесью, лежащие в

плоскости действия скалывающего напряжения, будут являться стопорами для скользящих дислокаций. Поэтому они будут накапливать вблизи себя дислокации и являться, таким образом, концентраторами напряжений, а как следствие, – возможными местами образования зародышей трещин.

Вследствие наличия ликваций в стали 08X18H10T исходная концентрация некоторых примесей локально от места к месту может отличаться весьма значительно. По этой причине, а также в результате обеднения твёрдого раствора с понижением энергии дефекта упаковки расщепления дислокаций и сегрегации примесей на дефектах упаковки будут также различны в этих областях. Из-за таких различий разрушение должно носить смешанный характер: вязкий и кристаллический с микротрещинами, что и наблюдается на изломе поперечных образцов.

В работе [8] установлено, что при пластической деформации с высокими скоростями в аустенитной стали такого типа дефекты упаковки являются концентраторами напряжения, что, по мнению авторов, приводит к образованию мартенсита и зарождению трещины. Весьма вероятно, что этот механизм реализуется и в нашем случае.

Из приведенных результатов ясно видно, что характер разрушения продольных и поперечных образцов отличается и коррелирует со значениями ударной вязкости и величиной относительного сужения. Продольные образцы разрушаются вязко, а поперечные имеют смешанный характер разрушения, причём в местах хрупкого кристаллического разрушения наблюдаются микротрещины, локализующиеся в теле зерна. Границы зёрен при этом имеют повышенную пластичность, что и препятствует распространению трещин на соседние зёрна. Ввиду того, что доля хрупкого кристаллического излома не высока (~20...30%), запас ударной вязкости остаётся значительным, а учитывая вязкость границ зёрен и тот факт, что трещины образуются при разрушении в продольном направлении, где толщина материала значительна, можно продлить срок службы данного элемента конструкции парогенератора.

4. ВЫВОДЫ

Исследуя физико-механические свойства стали крышки парогенератора на базе 150000 ч эксплуатации было обнаружено различие в величинах пластичности и ударной вязкости в образцах, вырезанных в продольном и поперечном направлениях от

носителем рабочей поверхности металла. Фрактографические исследования поверхности разрушения показали, что в поперечном направлении излом вязкий, ямочный, а в продольном – смешанный, вязкий с присутствием 20...30% хрупкой составляющей, внутри которой наблюдаются микротрещины. С помощью ПЭМ обнаружена анизотропия в распределении дефектов упаковки в продольном и поперечном направлениях. Особенности в разрушении образцов при испытании на ударную вязкость, вероятно, связаны с анизотропией, возникающей в распределении дефектов упаковки в поле напряжений, которые служат местами локализации последних, что может привести к образованию мартенсита и к хрупкому разрушению. Несомненно, полученные результаты представляют научный интерес и требуют дополнительного тщательного изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭ Г-008-89. *Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.*
2. А.А. Абагян, М.Б. Бакиров, В.Г. Васильев, Ю.А. Янченко. Контроль состояния металла оборудования и трубопроводов АЭС России после длительной эксплуатации // *Труды V Международной конференции «Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС».* Т.2. С-Петербург, 1998, с. 266–276.
3. ГОСТ 1497-84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение.*
4. ГОСТ 1497-84. *Металлы. Методы испытаний на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах.*
5. П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон, Д. Пешли, М. Уэлан. *Электронная микроскопия тонких кристаллов.* М.: «Мир», 1968, 576 с.
6. Л.В. Барханова, Э.Л. Дёмина. *Металлографическое травление металлов и сплавов.* М.: «Металлургия», 1986, 35 с.
7. В.В. Герасимов, А.С. Монахов. *Материалы ядерной техники.* М.: «Энергоиздат», 1982, 288 с.
8. П.Ю. Волосевич, В.Н. Гріднев, Ю.Н. Петров. Исследование структурных изменений аустенита при мартенситном превращении в сталях с повышенной энергией дефекта упаковки // *ФММ.* 1972, №34, с. 788–794.

ВПЛИВ ЧАСУ НА МІКРОСТРУКТУРУ СТАЛІ 08X18H10T ЩО ВІДРОБИЛА 150000 Г

В.В. Брик, О.С. Кальченко, Л.С. Ожигов, В.І. Савченко

Представлено результати дослідження фізико-механічних властивостей аустенітної хромонікелевої нержавіючої сталі 08X18H10T кришки парогенератора енергоблоку №1 Ровенської АЕС після 145,8 тис. г експлуатації. Виявлено анізотропію механічних властивостей у зразках, вирізаних у подовжньому і поперечному напрямках щодо робочої поверхні металу. За допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ) вивчені фрактографії зламів зразків, випробуваних на ударний вигин. Методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) досліджена структура металу.

INFLUENCE OF TIME FACTOR ON MICROSTRUCTURE OF STEEL 18CR-10NI-TI THAT HAD OPERATED DURING 150000 HOURS

V.V. Bryk, A.S. Kalchenko, L.S. Ozhigov, V.I. Savchenko

Results of physical-mechanical properties investigations of austenitic stainless steel 18Cr-10Ni-Ti of steam generator cover of Rovenskaya Atomic Power Station power unit №1 are presented after 145.8 thousands of operation. Anisotropy of mechanical properties is revealed in specimens cutted out in the longitudinal and in the transverse direction to the metal working surface. Fractographies of fracture of specimens tested impact bending are studied with the use of scanning electron microscopy (SEM). The metal structure was studied by transmission electron microscopy (TEM).