

УДК 539.171.016

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГООБЛОКОВ ЮЖНО-
УКРАИНСКОЙ АЭС ПОСЛЕ 100 ТЫСЯЧ ЧАСОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ***И.М. Неклюдов, В.М. Ажажа, Л.С. Ожигов, А.В. Бажуков*,**В.В. Алексейчук*, П.Е. Мельник***Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина;*** ОП ЮУ АЭС, г. Южноукраинск, Украина*

Определены механические свойства металла трубопроводов реакторного и турбинного отделения энергоблоков Южно-Украинской АЭС после 100 тыс. ч эксплуатации. Свойства металла определялись прямыми методами на стандартных образцах, по корреляционным зависимостям основных характеристик с твердостью, а также на микрообразцах, изготовленных из темплетов главных циркуляционных трубопроводов. Выполнен сравнительный анализ свойств отработавшего металла с исходным состоянием и требованиями нормативных документов. Проведены микроструктурные исследования отработавшего металла, с помощью растровой микроскопии изучена фрактография поверхности разрушения образцов на растяжение и ударный изгиб.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проблемы продления ресурса эксплуатации энергоблоков АЭС приобрели особую значимость. Это обуславливается их длительным сроком эксплуатации. Для обоснованного переназначения ресурса необходимо комплексное исследование фактического состояния основного оборудования и наиболее ответственных трубопроводов, обеспечивающих безопасную работу АЭС. В первую очередь это главный циркуляционный трубопровод, трубопроводы системы планового и аварийного охлаждения активной зоны, трубопроводы компенсатора объема, трубопроводы острого пара и питательной воды. В соответствии с требованиями нормативного документа, регламентирующего безопасную эксплуатацию АЭУ [1] контроль механических свойств металла этих трубопроводов для АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 проводится не реже чем через каждые 100 тыс. ч эксплуатации [2].

Данная работа посвящена обобщению результатов исследования состояния металла трубопроводов энергоблоков Южно-Украинской АЭС после 100 тыс. ч эксплуатации [3-5]. Механические свойства определялись прямыми методами на стандартных образцах, по корреляционным зависимостям характеристик механических свойств с твердостью и с помощью микрообразцов.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА
НА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦАХ**

Для определения механических свойств металла на стандартных образцах были вырезаны катушки из трубопроводов питательной воды следующих парогенераторов: 1ПГ2, 2ПГ-1, 3ПГ-1, 3ПГ-2. Из вырезанных катушек были изготовлены и испытаны образцы типа III по ГОСТ 1497-84 [6] и типа 11 по ГОСТ 9454-78 [7].

Для анализа эволюции механических свойств металла трубопроводов в процессе эксплуатации были изготовлены и испытаны стандартные образцы с исходным состоянием металла из катушки трубопровода питательной воды $\varnothing 426 \times 24$ мм (сталь 20).

Испытания на растяжение проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 [6] и ГОСТ 9651-84 [8] с помощью универсальной испытательной машины модели 1246P-2/2300 с максимальной нагрузкой 2000 кгс при скорости перемещения подвижного захвата 2 мм/мин. По результатам испытаний определяли следующие механические характеристики: R_m – предел прочности, $R_{0,2}$ – условный предел текучести, A – относительное удлинение, Z – относительное сужение.

Испытания на ударную вязкость проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78 [7] на образцах Шарпи с V-образным надрезом. Испытания выполняли на маятниковом копре типа WPM (Лейпциг), с предельной нагрузкой 30 кгс·м.

Изменение механических свойств металла трубопроводов в процессе эксплуатации определялось путем сравнения результатов испытаний стандартных образцов с исходным состоянием металла и после 100 тыс. ч наработки. Проводилось также сравнение полученных результатов с требованиями ТУ-14-3-460-75 [9], ПНАЭ Г-7-002-86 [10].

Результаты испытаний стандартных образцов с исходным состоянием металла и после 100 тыс. ч эксплуатации приведены в табл. 1 и 2.

Из приведенных данных видно, что механические свойства металла трубопроводов питательной воды после 100 тыс. ч эксплуатации удовлетворяют требованиям ТУ-14-3-460-75 [9] и не ниже соответствующих значений, приведенных в ПНАЭ-Г-7-002-86 [10]. По сравнению с исходным состоянием металла единой определенной закономерности не наблюдается, что, возможно, обусловлено отличием в

химическом составе металла в рамках технических условий.

Фрактографические исследования свидетельствуют о том, что материал разрушился вязко, в нем

отсутствуют элементы хрупкого излома. Характер разрушения образцов, испытанных на растяжение и на ударный изгиб, приведен на рис. 1 и 2.

Таблица 1

Механические свойства стали 20 при 20 °С в исходном состоянии и после 100 тыс. ч эксплуатации

Вид состояния	R _m , кгс/мм ²	R _{p0.2} , кгс/мм ²	Z, %	A, %	KCV, кгс·м/см ²	Примечание	
Исходное состояние	48.3	30.5	55.3	31.6	7.4	Характер изменения механических свойств индивидуален для каждого энергоблока	
Блок № 1; после 100 тыс. ч	46.1	28.3	60.4	38.3	5.0		
Блок № 2; после 100 тыс. ч	49.1	32.0	48.1	29.0	6.1		
Блок № 3; после 100 тыс. ч	50.2	31.3	63.0	33.4	8.2		
ТУ-14-3-460-75	продольные	42...56	не менее 22	не менее 45	не менее 24		не менее 5
	поперечные	не менее 41	не менее 22	не менее 40	не менее 22		не менее 4
ПНАЭ-Г-7-002-86	41	22	40	21	-		

Таблица 2

Механические свойства стали 20 при 350 °С в исходном состоянии и после 100 тыс. ч эксплуатации

Вид состояния	R _m , кгс/мм ²	R _{p0.2} , кгс/мм ²	Z, %	A, %	Примечание	
Исходное состояние	47.0	27.5	61.0	29.8	Характер изменения механических свойств индивидуален для каждого энергоблока	
Блок № 1; после 100 тыс. ч (250 °С)	45.0	-	54.4	25.0		
Блок № 2; после 100 тыс. ч	47.3	28.7	59.5	28.2		
Блок № 3; после 100 тыс. ч	48.1	28.2	61.8	31.7		
ТУ-14-3-460-75	продольные	не менее 16	-	-		-
	поперечные	-	-	-		-
ПНАЭ-Г-7-002-86	36.0	16.0	42.0	17.0		

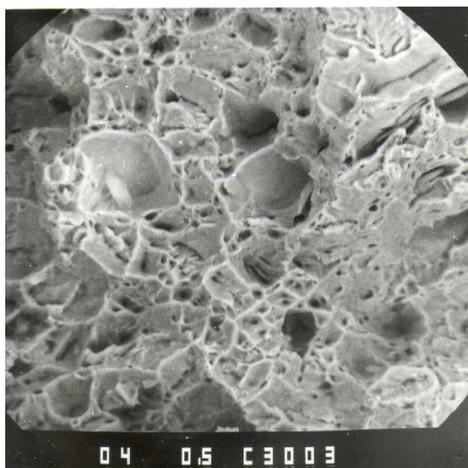


Рис. 1. Образец после испытаний на растяжение. Общий вид поверхности отрыва; × 500

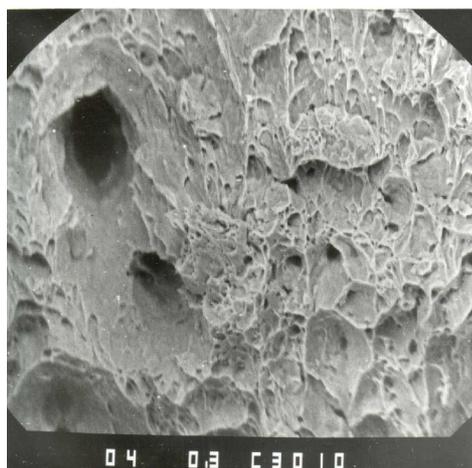


Рис. 2. Образец после испытаний на ударный изгиб. Общий вид поверхности ямки; × 300

Металлографические исследования, оценку микроструктуры, определение содержания примесных включений проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 5639-82 [8], ГОСТ 5640-68 [9], ГОСТ 1778-70. Исследования проводились на микроскопе модели МИМ-8М. Соотношение содержания феррита и перлита в исследованных образцах находится в

пределах от 65 к 35% до 80 к 20%. Средний размер зерна d_{ср}=20 мкм. Загрязнённость неметаллическими включениями в пределах технических условий на металл трубопровода. Металлографические исследования отработавшего металла показали, что структура металла трубопроводов питательной воды соответствует требованиям ТУ-14-3-460-75.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ПО ТВЕРДОСТИ

Расчет механических свойств по характеристикам твердости – доступный и распространенный метод, позволяющий выполнить большой объем исследований и выявить существенные изменения механических свойств и структуры металла в процессе эксплуатации.

В соответствии с РД ЭО 0027-94 “Определение характеристик механических свойств оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости” [11] для трубопроводов реакторного и турбинного отделения определены предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение.

Погрешность вычислений в соответствии с методикой составляет для характеристик прочности – не более 10%, для характеристик пластичности – не более 20%.

Для сварных соединений проведены измерения твердости основного металла, сварного шва и зоны термического влияния; растянутой, сжатой и нейтральной зоны для гибов и основного металла для мест присоединения опор. Для точности измерений в местах замеров твердости произведена механическая зачистка поверхности трубопроводов на глубину не менее 0,2 мм, шириной не менее 10 мм, длиной не менее 25 мм, обеспечившая шероховатость поверхностей $Ra \leq 3,2$ мкм (6 класс шероховатости). Количество мест зачистки – не менее 3-х для каждого исследуемого участка.

Сравнение рассчитанных механических свойств с требованиями ПНАЭ-Г-7-002-86 [10] и технических условий показало, что они не ниже соответствующих значений, приведенных в нормативной документации на металл трубопроводов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ МИКРООБРАЗЦОВ

Контроль механических свойств металла трубопроводов осуществляется путем вырезки образцов или испытанием образцов-свидетелей [1]. Однако эти методы не применимы для главного циркуляционного трубопровода ввиду того, что вырезка катушек снижает конструкционную прочность, а уста-

новка образцов-свидетелей не предусмотрена проектом. Учитывая высокую степень важности для безопасной эксплуатации АЭС главного циркуляционного трубопровода, вместе с методом твердости для определения механических свойств металла был применен метод микрообразцов. Для этого разработан комплекс “Микрорез”, согласована в ГКЯРУ и утверждена НАЭК “Энергоатом” методика определения механических свойств металла оборудования и трубопроводов АЭС с помощью микрообразцов РД.00.ЭК.ХФ.МО.М.09-99 [12].

В соответствии с “Рабочими программами эксплуатационного контроля...” на гихах “холодной” и “горячей” петли ГЦТ без нарушения конструкционной целостности и прочности вырезаны темплеты для изготовления микрообразцов. В местах вырезки произведена механическая зачистка с обеспечением плавных переходов до шероховатости $Ra \sim 1.25$ мкм, выполнены капиллярный контроль и контроль толщины стенки колена. Результаты контроля удовлетворительные.

По результатам испытания микрообразцов определены:

- механические свойства на растяжение (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение) при температурах 20 и 350 °С;

- ударная вязкость при температуре 20 °С.

Диаграмма растяжения стали после 100 тыс. ч эксплуатации по внешнему виду характерна для пластичных металлов, разрушение которых происходит с образованием шейки. Появление шейки определяет переход от равномерной деформации всей рабочей части образца к сосредоточенной деформации в определенном сечении.

Характер разрушения микрообразцов исследовали на электронном микроскопе. Вязкое транскристаллитное разрушение образцов, испытанных на ударный изгиб и ямочный характер разрушения образцов на растяжение характеризуют высокую пластичность металла ГЦТ.

В табл. 3-4 приведены результаты испытаний отработавшего металла в сравнении с:

- ПНАЭ Г-7-002-86;
- техническими условиями;
- исходным состоянием металла;
- паспортными данными.

Таблица 3

Механические свойства металла ГЦТ при 20 °С

Вид состояния	R^T_m , кгс/мм ²	$R^T_{p0,2}$, кгс/мм ²	A, %	Z, %	Примечание	
ПНАЭ Г-7-002-86	н е м е н е е				После 100 тыс. ч эксплуатации наблюдается тенденция к упрочнению и снижению пластичности	
	55	35	16	55		
ТУ 975 Е004511. Ред.5	55...65	35...50	≥16	≥55		
Исходное состояние	59	44	28	75		
Блок № 1	по паспорту	57.4	41.9	29.4		75.6
	после 100 тыс. ч	60.7	46.2	27.3		74.7
Блок № 2	по паспорту	56.9	43.9	26.7		75.6
	после 100 тыс. ч	60.8	50.0	25.8		74.0
Блок № 3	по паспорту	58.9	46.3	25.5		71.1
	после 100 тыс. ч	72.0	57.7	22.4		67.5

Механические свойства металла ГЦТ при 350 °С

Вид состояния	R_{m}^T , кгс/мм ²	$R_{p0,2}^T$, кгс/мм ²	A, %	Z, %	Примечание	
ПНАЭ Г-7-002-86	н е м е н е е				После 100 тыс. ч Эксплуатации наблюдается тенденция к упрочнению и снижению пластичности	
	50	30	14	50		
ТУ 975 Е004511. Ред.5	н е м е н е е					
	50	30	14	50		
Исходное состояние		52.5	39	26.5		71
Блок № 1	по паспорту	52.3	31.9	25.3		71.8
	после 100 тыс. ч	55.6	40.4	22.5		72.0
Блок № 2	по паспорту	52.0	38.3	21.8		68.7
	после 100 тыс. ч	53.0	40.0	21.0		69.0
Блок № 3	по паспорту	54.4	41.6	21.5		68.9
	после 100 тыс. ч	63.2	47.3	20.4	66.5	

Для испытаний на ударную вязкость использовали маятниковый копер WPM-30 (производство Германия). Испытания проводили при комнатной температуре в соответствии с требованиями ТУ.

В соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86 в атомной энергетике основным типом образцов для испытаний на ударный изгиб является образец Шарпи тип 11 (V-образный надрез 10x10x55 мм). Вместе с тем ГОСТ 9454-78 допускает использование образцов

других размеров, в частности, типа 14 (2x8x55 мм с V-образным надрезом). Учитывая влияние масштабного фактора на испытания на ударный изгиб, необходимо вводить поправочные коэффициенты, позволяющие откорректировать полученные результаты, на данные, которые были бы получены при испытании образцов типа 11. Результаты испытаний микрообразцов на ударный изгиб приведены в табл. 5.

Таблица 5

Ударная вязкость KCV (кгс·м/см²) металла ГЦТ энергоблоков ЮУ АЭС при 20 °С

Вид состояния	Образцы				Примечание
	Толщина, мм				
	1	2	5	10	
	Тип образца				
	микро	14	13	11	
Исходное состояние	8,7	12,1	23,2	27,1	По ТУ975Е000451 (ред. 5) для типа 11 не менее 4,8. По этим данным определены корреляционные соотношения
Блок № 1 после 100 тыс. ч	-	9,6	-	21,6	По паспорту 21,0 кгс·м/см ² (без изменения KCV)
Блок № 2 после 100 тыс. ч	-	10,8	-	24,2	По паспорту 28,3 кгс·м/см ² (снижение KCV на 14,5%)
Блок № 3 после 100 тыс. ч	-	10,0	-	22,4	По паспорту 18,0 кгс·м/см ² (увеличение KCV на 24,4%); по отношению к исходному (снижение на 17,3%)

ВЫВОДЫ

Разрушающими и неразрушающими методами определены механические свойства металла трубопроводов реакторного и турбинного отделений Южно-Украинской АЭС после 100 тыс. ч эксплуатации, включая: ГЦТ, трубопроводы САОЗ, дыхательный трубопровод, трубопроводы острого пара и питательной воды прямыми методами на стандартных образцах и микрообразцах. Определены предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость. Проведена фрактография изломов образцов и микроструктурные исследования. Выполнен расчет механических свойств металла трубопроводов по твердости.

Установлено, что механические свойства и структура металла трубопроводов соответствуют нормативным документам, сертификатам и техническим условиям на трубопроводы.

Для прогнозирования остаточного ресурса оборудования и трубопроводов АЭС целесообразно применять комплексный подход, заключающийся в сочетании метода прямых испытаний стандартных образцов, микрообразцов и метода твердости.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭ Г-7-008-89. "Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок".

2. 2ПНАЭ Г-7-010-89. "Оборудование и трубопроводы АЭУ. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля".
3. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов и др. Использование микрообразцов для контроля механических свойств и эволюции микроструктуры основного металла главного циркуляционного трубопровода (сталь 10ГН2МФА) энергоблока №1 ОП ЮУ АЭС после 100 тыс. часов эксплуатации // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1999, №45, с. 63-75.
4. И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов и др. Результаты исследований механических свойств металла трубопроводов энергоблока № 2 ОП ЮУ АЭС после 100 тыс. часов эксплуатации // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2004, № 3, с. 52-58.
5. И.М. Неклюдов, В.М. Ажажа, Л.С. Ожигов и др. Результаты исследований механических свойств металла трубопроводов энергоблока № 3 Южно-украинской АЭС после 100 тыс. часов эксплуатации // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2007, №2, с.101-106.
6. ГОСТ 1497-84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*.
7. ГОСТ 9454-78. *Металлы. Методы испытаний на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температуре*.
8. ГОСТ 9651-84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах*.
9. ТУ-14-3-460-75. *Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов*.
10. ПНАЭ Г-7-002-86. "Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок".
11. Инструкция РД ЭО 0027-94. "Определение характеристик механических свойств металла оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости".
12. РД.00.ЭК.ХФ.МО.М.09-99. *Методика определения механических свойств металла оборудования и трубопроводов АЭС с помощью микрообразцов*.
13. ГОСТ 5639-82. *Сталь и сплавы, методы выявления и определения величины зерна*.
14. ГОСТ 5640-68. *Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты*.
15. ГОСТ 8233-56. *Сталь, эталоны микроструктуры*.
16. ТУ975Е004511. Ред. 5. *Трубы бесшовные плакированные*.
17. МИ 1317-86. *Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений*.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ ТРУБОПРОВІДІВ ЕНЕРГОБЛОКІВ ЮЖНО-УКРАЇНСЬКОЇ АЕС ПІСЛЯ 100 ТИСЯЧ ГОДИН ЕКСПЛУАТАЦІЇ

І.М. Неклюдов, В.М. Ажажа, Л.С. Ожигов, А.В. Бажуков, В.В. Алексійчук, П.Е. Мельник

Визначені механічні властивості металу трубопроводів реакторного та турбінного відділення енергоблоків Южно-Української АЕС після 100 тис. годин експлуатації. Властивості металу визначались прямими методами на стандартних зразках, по кореляційних залежностях основних характеристик з твердістю, а також на мікроразках, виготовлених із темплетів головних циркуляційних трубопроводів. Виконан порівняльний аналіз властивостей відпрацьованого металу з вихідним станом та вимогами нормативних документів. Проведено мікроструктурні дослідження відпрацьованого металу, з допомогою растрової мікроскопії вивчена фрактографія поверхні зруйнування зразків на розтягування та ударний вигиб.

THE RESULTS OF RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE PIPELINES METAL OF SOUTH-UKRAINIAN NPP AFTER 100,000 HOURS OF OPERATION

I.M. Neklyudov, V.M. Azhazha, L.S. Ozhigov, A.V. Bazhukov, V.V. Alekseychuk, P.E. Melnik

Mechanical properties of metal of pipelines of reactor and turbine separation of power units South-Ukrainian NPP are certain after 100.000 hours of exploitation. Properties of metal concerned by direct methods on standard specimens, on cross-correlation dependences of basic descriptions with hardness, and also on microspecimens made from templets main circulation pipelines. Executed the comparative analysis of properties of exhausted metal with the initial state and requirements of normative documents. Microstructure research of exhausted metal was carried out, surface fractography of tension tested specimens and Charpy impact was studied by means of a raster microscope.