

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГБЛОКА № 3 ЮЖНОУКРАИНСКОЙ АЭС ПОСЛЕ 100 ТЫС. ЧАСОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*И.М. Неклюдов, В.М. Ажжа, Л.С. Ожигов, В.В. Брык,
В.И. Савченко, С.В. Гоженко, П.А. Мищенко
ИФТТМТ ННЦ ХФТИ, г. Харьков, Украина;
А.В. Бажуков, П.Е. Мельник, В.В. Алексейчук
ОП ЮУ АЭС, г. Южноукраинск, Украина*

Определены механические свойства металла трубопроводов реакторного и турбинного отделения третьего энергоблока Южноукраинской АЭС (ЮУ АЭС) прямыми методами на стандартных образцах, по корреляционным зависимостям основных характеристик с твердостью, а также на микрообразцах, изготовленных из темплета главного циркуляционного трубопровода. Проведены микроструктурные исследования отработавшего 100 тыс. ч металла. С помощью растровой микроскопии изучена фрактография поверхности разрушения образцов на растяжение и ударный изгиб.

1. ВВЕДЕНИЕ

Надёжность и безопасность АЭС в основном зависит от надёжной работы ее конструктивных элементов; их надёжность, в свою очередь, обусловлена текущим состоянием материалов, из которых они изготовлены. В настоящее время проблемы состояния и работоспособности материалов атомных энергетических установок (АЭУ) приобрели особое значение ввиду длительных сроков эксплуатации.

В соответствии с основным нормативным документом ПНАЭ Г-7-008-89 [1], регламентирующим безопасную эксплуатацию оборудования и трубопроводов АЭУ, контроль механических свойств металла трубопроводов выполняют разрушающими и (или) неразрушающими методами не реже, чем через каждые 100 тыс. ч эксплуатации для АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) [2].

Данная работа посвящена определению различными методами механических свойств металла трубопроводов реакторного и турбинного отделений, включая ГЦТ, трубопроводы САОЗ, дыхательный трубопровод, трубопроводы острого пара и питательной воды. Найдены предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость.

Механические свойства определялись прямыми методами на стандартных образцах и микрообразцах. Выполнен расчет механических свойств металла трубопроводов по характеристикам твердости. С помощью растровой электронной микроскопии изучена фрактография поверхности разрушения микрообразцов. Проведены микроструктурные исследования.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА НА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦАХ

Для определения механических свойств металла на стандартных образцах вырезались катушки из трубопроводов питательной воды ПГ-1 и ПГ-2. Из этих катушек были изготовлены и испытаны продольные и поперечные образцы типа III по ГОСТ 1497-84 [3] и типа 11 по ГОСТ 9454-78 [4].

Для подробного 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).

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 [5], ПНАЭ Г-7-002-86 [6].

Испытания на растяжение проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 [3] и ГОСТ 9651-84 [7]. По результатам испытаний определяли следующие механические характеристики: R_m – предел прочности; $R_{0,2}$ – условный предел текучести; A – относительное удлинение; Z – относительное сужение.

Испытания проводили на универсальной испытательной машине модели 1246P-2/2300 с максимальной нагрузкой 2000 кгс при скорости перемещения подвижного захвата 2 мм/мин. Установка снабжена двухкоординатным электронным потенциометром для записи диаграмм растяжения в координатах “нагрузка-перемещение” в широком интервале масштабов по осям “P” и “L”.

Испытания на ударную вязкость проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78 [4] на образцах Шарпи с V-образным надрезом. Испытания

выполняли на маятниковом копре с предельной нагрузкой 30 кгс·м типа WPM (Германия), 408/44.

Результаты сравнения механических свойств исходного состояния металла и после 100 тыс. ч приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Сравнение механических свойств 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
Среднее значение механических свойств исходных образцов	48,3	30,5	60,3	32,3	7,9
Среднее значение механических свойств образцов после 100 тыс. ч	50,2	31,3	63,0	33,4	8,2
Отличие, %	+4,2	+2,6	+4,3	+3,3	+3,8

Таблица 2

Сравнение механических свойств 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, %
Среднее значение механических свойств исходных образцов	47,0	27,5	61,0	30,2
Среднее значение механических свойств образцов после 100 тыс. ч	48,1	28,2	61,8	31,7
Отличие, %	+2,3	+2,5	+1,3	+4,7

Металлографические исследования, оценку микроструктуры, определение содержания примесных включений проводили на 4-х образцах на растяжение и 2-х образцах на ударный изгиб в соответствии с требованиями ГОСТ 5639-82 [8], ГОСТ 5640-68 [9], ГОСТ 1778-70. Исследования проводились на микроскопе модели МИМ-8М. Во всех образцах наблюдалось повышенное содержание шлаковых включений в виде силикатов хрупких (СХ), пластичных (СП) и недеформирующихся (СН). Включения

располагаются в виде строчек, отдельных вкрапленных или небольших скоплений глобулей. Кроме того, в стали присутствуют сульфиды, в отдельных местах которых вкраплены силикаты.

Оксиды и нитриды присутствуют в минимальных количествах и при увеличениях в 100 раз не определяются чётко. Оценка загрязнённости в баллах согласно эталонам ГОСТ приведена ниже в табл. 3. Балл по металлическим включениям определялся по наиболее загрязнённому месту.

Таблица 3

Содержание неметаллических включений в стали 20 после 100 тыс. ч эксплуатации

Номер образца	Виды неметаллических включений					Нитриды
	Оксиды	Сульфиды	Силикаты			
			СХ	СП	СН	
1р	<1	2-б	2-б	2-б	<1	<1
2р	<1	3-б	<1	2-б	<1	<1
3р	<1	2-б	<1	1-б	2-б	<1
4р	<1	2-б	2-б, в	2-б	2-б	<1
5у	<1	1-б	2-б	1-б	2-а,б	<1
6у	<1	2-б	3-б	1-б	3-б	<1

По структуре после травления в 4% спиртовом растворе HNO₃ и насыщенном растворе пикриновой кислоты в воде выявлено содержание феррита и перлита в соотношении 65 к 35%. Оценка производилась согласно фотоэталонам ГОСТ 8233-56 [10]. Это соотношение согласно ГОСТ более характерно для стали 35, чем для стали 20. Структура перлита более грубая с крупными выделениями отдельных составляющих.

Характер разрушения всех образцов вязкий, транскристаллитный (проходит через зерна феррита и перлита, проявляющие значительную степень деформации).

В результате проведенных металлографических исследований было установлено, что структура исследованной стали удовлетворяет требованиям технических условий на металл трубопроводов.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ПО ТВЕРДОСТИ

Механические свойства металла трубопроводов реакторного и турбинного отделения определялись в соответствии с разработанной ВНИИАЭС инструкцией РД ЭО 0027-94 «Определение характеристик механических свойств оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости» [11].

Для измерения твердости произведена механическая зачистка в местах замеров на глубину не менее 0,2 мм, шириной не менее 20 мм, длиной не менее 100 мм, с обеспечением шероховатости поверхностей $Ra \leq 3,2$ мкм (6-й класс шероховатости). Количество измерений не менее 3-х для каждого места.

Замеры твердости выполнялись в 4-х диаметрально-противоположных местах. Измеряли твердость основного металла, сварного шва и зоны термического влияния для сварных соединений, растянутой, сжатой и нейтральной зон для гибов и основного металла для мест присоединения опор.

Сравнение рассчитанных характеристик механических свойств с требованиями нормативных документов показало, что они не ниже соответствующих значений, приведенных в нормативной документации на металл трубопроводов.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ГЛАВНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА С ПОМОЩЬЮ МИКРООБРАЗЦОВ

Целью работы, результаты которой изложены в настоящем разделе, явилось определение прямыми методами механических свойств основного металла главного циркуляционного трубопровода после 100 тыс. ч эксплуатации без нарушения конструктивной целостности и прочности.

В соответствии с «Рабочей программой проведения эксплуатационного периодического контроля механических свойств металла трубопроводов после 100 тыс. ч эксплуатации для энергоблока № 3 ОП ЮУ АЭС» проведена электроэрозионная вырезка темплета из основного металла ГЦТ (петля № 3, «холодная нитка», $\varnothing 995 \times 80$) на расстоянии 175 мм ниже сварного шва № 3-5. Ультразвуковая толщинометрия показала, что в месте изгиба (зона сжатых волокон) минимальная толщина трубопровода составляет 82,1 мм.

На выбранном участке трубопровода был организован участок для вырезки темплета, подведены соответствующие коммуникации для обеспечения работы комплекса "Микрорез". Вырезка осуществлялась в соответствии с методикой РД.00.ЭК.Х-Ф.МО.М.09-99 [12].

По завершению работ была произведена механическая зачистка места вырезки с обеспечением плавных переходов до шероховатости поверхности $Ra \sim 1,25$ мкм. В месте извлечения темплета выполнен

капиллярный контроль и контроль толщины стенки колена. Результаты контроля удовлетворительные.

Из вырезанного темплета изготовили образцы для определения:

- прямыми методами механических свойств металла ГЦТ на растяжение (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение) при температурах 20 и 350 °С;

- ударной вязкости металла ГЦТ при температуре 20 °С [5, 13].

Испытания образцов на растяжение проводили на универсальной испытательной машине модели 1246P-2/2300 (производство НИКИМП), а также на воздухе при комнатной температуре и при 350 °С в вакууме.

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.

В табл. 4-5 приведены результаты механических испытаний отработавшего металла в сравнении с НТД:

- ПНАЭ Г-7-002-86,
- техническими условиями,
- паспортом на колено ГЦТ.

Для испытаний на ударную вязкость использовали маятниковый копер модели WPM-30 (производство Германии).

В соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86 в атомной энергетике основным типом образцов для испытаний на ударный изгиб является образец Шарпи типа 11 (10x10x55 мм с V-образным надрезом). Вместе с тем ГОСТ 9454-78 [8] допускает использование образцов других размеров, в частности, типа 14 (2x8x55 мм с V-образным надрезом). Учет масштабных факторов производился введением поправочных коэффициентов [14]. Результаты испытаний на ударный изгиб и их соответствующие откорректированные величины приведены в табл. 6.

Металлографические исследования, оценку микроструктуры металла ГЦТ, определение процентного содержания феррита и перлита проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 1778-70, ГОСТ 8233-56. Содержание перлита и феррита - 65 и 35 % соответственно.

Металлографический анализ стали 10ГН2МФА после эксплуатации показал, что содержание неметаллических включений в металле составляет по шкале оксидов: оксиды – 2 балла, сульфиды – 2 балла; по шкале нитридов: оксиды – 1 балл, сульфиды – 1 балл. (Содержание неметаллических включений определяли по соответствующим шкалам ГОСТ 1778-70).

Характер разрушения испытанных на растяжение и на ударный изгиб микрообразцов исследовали на электронном микроскопе JEMCX при помощи растровой приставки ASID-4D при ускоряющем напряжении 40 кВ.

На рис. 1 приведена фрактография поверхности излома испытанных на ударный изгиб образцов. Наблюдается вязкое транскристаллитное разрушение.

Поверхность излома и ямки в изломе характеризуют высокую пластичность стали.

Таблица 4

Результаты механических испытаний образцов металла ГЦТ при 20 °С

Нормативные документы и исследуемые параметры	$R^1_{m,}$ кгс/мм ²	$R^1_{P0,2,}$ кгс/мм ²	A, %	Z, %
ПНАЭ Г-7-002-86 [6]	≥55	≥35	≥16	≥55
ТУ 975 Е004511. Ред.5 [13]	55...65	35...50	≥16	≥55
Паспорт на колено	58,9	46,3	25,5	71,1
Результаты испытаний исходного металла	59	44	28	75
Результаты испытаний металла после 100 тыс. ч эксплуатации	72,0	57,7	22,4	67,5
Изменение свойств отработавшего металла по отношению к паспортным данным, %	+22,2	+24,6	-12,2	-5,1
Изменение свойств отработавшего металла по отношению к исходному металлу, %	+22,0	+31,1	-20,0	-10,0

Таблица 5

Результаты механических испытаний образцов металла ГЦТ при 350 °С

Нормативные документы и исследуемые параметры	$R^1_{m,}$ кгс/мм ²	$R^1_{P0,2,}$ кгс/мм ²	A, %	Z, %
ПНАЭ Г-7-002-86 [6]	≥50	≥30	≥14	≥50
ТУ 975 Е004511. Ред.5 [13]	≥50	≥30	≥14	≥50
Паспорт на колено	54,4	41,6	21,5	68,9
Результаты испытаний исходного металла	52,5	39	26,5	71
Результаты испытаний металла после 100 тыс. ч эксплуатации	63,2	47,3	20,4	66,5
Изменение свойств отработавшего металла по отношению к паспортным данным, %	+16,2	+13,7	-5,1	-3,5
Изменение свойств отработавшего металла по отношению к исходному металлу, %	+20,4	+21,3	-23,0	-6,3

Таблица 6

Ударная вязкость KCV, (кгс·м)/см² металла ГЦТ энергоблоков ЮУ АЭС после 100 тыс. ч эксплуатации

Изделие	Ударная вязкость KCV, (кгс·м)/см ²		Примечание
	Толщина образца, мм		
	2	10	
	Тип образца		
	14	11	
ГЦТ 1-го блока	9,6	21,6*	По паспорту 21,0 (кгс·м)/см ² (без изменения KCV)
ГЦТ 2-го блока	10,8	24,2*	По паспорту 28,3 (кгс·м)/см ² (снижение KCV на 14,5 %)
ГЦТ 3-го блока	10,0	22,4*	По паспорту 18,0 (кгс·м)/см ² (увеличение KCV на 24,4 %)

*Поправочный коэффициент 2,24 [14].

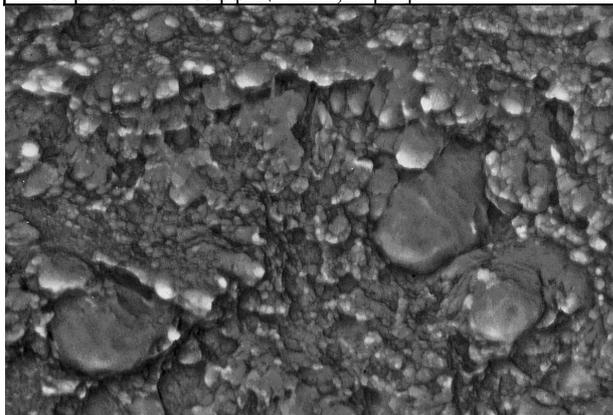


Рис. 1. Образец ГЦТ после испытаний на ударный изгиб. Ямочный излом; $\times 1000$

На рис. 2 приведена фрактография поверхностей излома (отрыва) испытанных на растяжение при 20 °С образцов. Вязкий ямочный характер разрушения обусловлен высокой пластичностью стали ГЦТ.

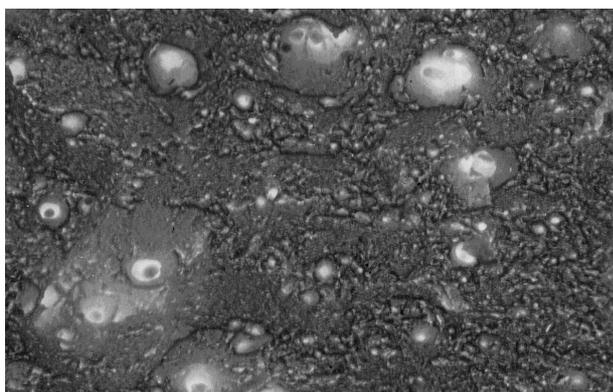


Рис. 2. Образец после испытаний на растяжение. Общий вид поверхности разрушения; $\times 300$

На рис. 3 приведена фрактография поверхностей излома (отрыва) испытанных на растяжение при 350 °С образцов. Излому путем отрыва предшествует интенсивное сосредоточенное удлинение с последующим образованием шейки. Фрактографические исследования характера разрушения образцов свидетельствуют о том, что материал разрушился вязко.

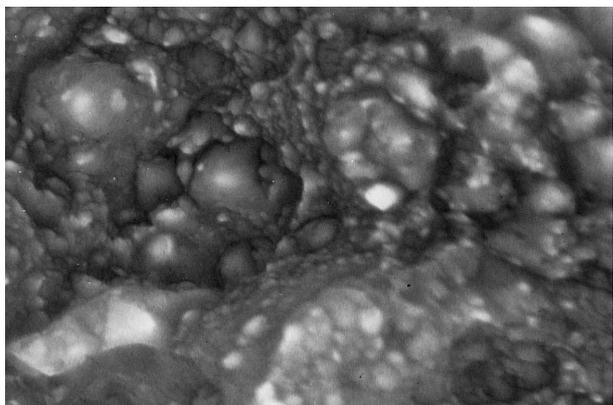


Рис. 3. Образец после испытаний на растяжение. Ямочный отрыв; $\times 2000$

5. ВЫВОДЫ

1. Разрушающими и неразрушающими методами определены механические свойства металла трубопроводов реакторного и турбинного отделений третьего энергоблока ЮУ 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.

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

3. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что после 100 тыс. ч эксплуатации имеет место тенденция к упрочнению металла и снижению пластичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
2. ПНАЭ Г-7-010-89. Оборудование и трубопроводы АЭУ. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля.
3. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
4. ГОСТ 9454-78. Металлы. Методы испытаний на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температуре.
5. ТУ-14-3-460-75. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.
6. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
7. ГОСТ 9651-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах.
8. ГОСТ 5639-82. Сталь и сплавы, методы выявления и определения величины зерна.
9. ГОСТ 5640-68. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты.
10. ГОСТ 8233-56. Сталь, эталоны микроструктуры.
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.ТУ975Е004511. Ред. 5. *Трубы бесшовные плакированные.*

14.И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов и др. Результаты исследований механических свойств металла тру-

бопроводов энергоблока № 2 ОП ЮУ АЭС после 100 тыс. ч эксплуатации // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (85).* 2004, № 3, с. 52–58.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ ТРУБОПРОВІДІВ ЕНЕРГОБЛОКУ №3 ЮЖНОУКРАЇНСЬКОЇ АЕС ПІСЛЯ 100 ТИС. ГОДИН ЕКСПЛУАТАЦІЇ

І.М. Неклюдов, В.М. Ажажа, Л.С. Ожигов, В.В. Брик, В.І. Савченко, С.В. Гоженко, П.О. Міщенко, А.В. Бажуков, П.Е. Мельник, В.В. Алексейчук

Визначені механічні властивості металу трубопроводів реакторного та турбінного відділення третього енергоблоку Южноукраїнської АЕС прямими методами на стандартних зразках, по кореляційних залежностях основних характеристик із твердістю, а також на мікроразках, виготовлених із темплету головного циркуляційного трубопроводу. Проведено мікроструктурні дослідження відпрацьованого 100 тис. годин металу. За допомогою растрової мікроскопії вивчена фрактографія поверхні руйнування зразків на розтягування та ударний згин.

THE RESULTS OF RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE PIPELINES METAL OF POWER UNIT №3 SOUTH-UKRAINIAN NPP AFTER 100,000 HOURS OF EXPLOITATION

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

Mechanical properties of metal of pipelines of reactor and turbine separation of South-Ukrainian NPP-3 are certain by direct methods on standard specimens, on cross-correlation dependences of basic descriptions with hardness, and also on microspecimens of main circulation pipeline. Microstructure research of exhausted during 100.000 hours metal was carried out. Surface fractography of tension tested specimens and Charpy impact was studied by means of a raster microscope.