

## 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

*В.Ф. Зеленский\*, И.М. Неклюдов\*, Л.С. Ожигов\*\*, В.М. Пышный\*\*, А.С. Митрофанов\*\*, С.В. Гоженко\*\*, В.И. Савченко\*, В.В. Брык\*, Н.Д. Рыбальченко\**

*\*ННЦ ХФТИ, г. Харьков, \*\*ДП “Энергоатом контроль-сервис”, г. Энергодар*

Приведены результаты исследований по контролю механических свойств основного металла ГЦТ ЮУ АЭС после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации, впервые полученные с помощью методики микрообразцов. Разработана методика и оборудование для вырезки с трубопроводов заготовок под микрообразцы без нарушения их конструкционной целостности. Разработана система контроля механических свойств с использованием микрообразцов. Обсуждаются перспективы применения методики микрообразцов в качестве метода контроля металла оборудования и трубопроводов АЭС.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

“Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок” ПНАЭ-Г-7-008-89 [1] п. 7.6.3 требуют проведения контроля механических свойств трубопроводов разрушающими и (или) неразрушающими методами не реже, чем через каждые  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации для АЭУ с водо-водяными реакторами. Периодический контроль механических свойств металла трубопроводов обусловлен необходимостью выявления и анализа изменений физико-механических свойств с целью проверки их соответствия: требованиям проекта, стандартам и техническим условиям на металл трубопроводов, действующей нормативно-технической документации, исходным значениям механических свойств металла трубопроводов АЭУ.

Целью настоящей работы явилось определение прямыми методами механических свойств основного металла главного циркуляционного трубопровода и изучение эволюции микроструктуры стали 10ГН2МФА после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации на энергоблоке № 1 ЮУ АЭС без нарушения конструкционной целостности и прочности и выполнение тем самым требования п. 7.6.3 ПНАЭ Г-7-008-89.

Работа выполнялась в соответствии с “Комплексной программой проведения периодического контроля механических свойств металла трубопроводов энергоблока № 1 ЮУ АЭС после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации”, разработанной ЦНИИ КМ “Прометей” при участии ОП ЮУ АЭС, ННЦ ХФТИ и ДП ЭАКС.

### 2. СВОЙСТВА СТАЛИ 10ГН2МФА ПО ТОЛЩИНЕ ГЦТ

Известно, что после термической обработки физико-механические свойства металла толстостенных труб обычно неоднородны по толщине трубы, что связано с неоднородной прокаливаемостью детали.

Главный циркуляционный трубопровод (ГЦТ) реактора ВВЭР-1000 изготовлен из конструкционной стали 10ГН2МФА в виде бесшовных труб и ко-

лен с плакированной внутренней поверхностью (плакировка сталь 08Х19Н10Г2Б). Сталь 10ГН2МФА применяется в термообработанном состоянии. Термообработка состоит из основной термообработки (закалка с отпуском или нормализация с отпуском) и дополнительных технологических отпусков в процессе изготовления [2, 3].

Размеры трубопровода Ду850: наружный диаметр 990 мм, внутренний диаметр 850 мм, толщина стенки 70 мм.

В качестве исходного металла использовалась плакированная катушка ГЦТ, полученная нами с ОП ЗАЭС. Из катушки был вырезан темплет, который был разрезан на заготовки с размерами  $10 \times 10 \times 55$  мм, из которых были изготовлены образцы для механических испытаний. На заготовках были проведены также измерения твердости и проведены металлографические исследования.

Микроструктура металла по толщине начиная от поверхности трубы до наплавки достаточно однородна и характеризуется как перлит.

Результаты механических испытаний и измерений твердости представлены в табл. 1.

Из приведенных данных видно, что твердость стали по толщине ГЦТ практически не отличается (в таблице приведены средние значения из 7-9 измерений). Механические свойства на растяжение также практически одинаковы по толщине ГЦТ. Незначительное снижение предела текучести на внутренней части трубы, возможно, обусловлено дополнительным нагревом при нанесении наплавки.

### 3. УСТАНОВЛЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИКРООБРАЗЦОВ И СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ

В соответствии с утвержденной “Методикой определения механических свойств металла оборудования и трубопроводов АЭС с помощью микрообразцов” РД.00.ЭК.ХФ.МО.М.09-99[4] необходимо предварительно на стандартных образцах и микрообразцах различной толщины из архивного (исходного) металла установить соответствие механи-

ческих свойств и определить толщину микрообразцов, при которой механические свойства при растяжении (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение) соответствуют этим свойствам для стандартных образ-

цов.[7,8] Для образцов, испытываемых на ударный изгиб, определяются поправочные коэффициенты между образцами типа 11 (v-образный надрез, 10x10x55 мм) и микрообразцами[7-16].

Таблица 1

**Механические свойства и твердость конструкционной стали 10ГН2МФА по толщине**  
**ГЦТ (Т<sub>исп</sub> = 20° С)**

Марка стали	Временное сопротивление разрыву R <sub>m</sub> <sup>T</sup> , кгс/мм <sup>2</sup>	Предел текучести R <sub>T0,2</sub> <sup>T</sup> , кгс/мм <sup>2</sup>	Относительное сужение Z, %	Относительное удлинение A, %	Твердость HRB	Примечание
Внешняя сторона 1.1	59,5	45,5	78,0	28,0	87,0	Результаты испытаний
1.2	-	-	-	-	88,8	-
1.3	59,5	44,5	77,3	28,5	87,3	Результаты испытаний
1.4					87,3	-
1.5	58,5	43,0	76,3	28,0	86,0	Результаты испытаний
Среднее значение 1.6	59,0	44,0	77,0	28,0	87,4	

Под микрообразцами для испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497-84 [5] понимают образцы, диаметр или толщина которых менее 3 мм, а для испытаний на ударную вязкость в соответствии с ГОСТ 9454-78 – менее 2 мм [6].

**3.1. Кратковременные механические свойства**

Из архивной катушки ГЦТ (сталь 10ГН2МФА) были изготовлены стандартные образцы и микрообразцы с целью установления коррекции между механическими свойствами.

Были изготовлены следующие образцы:

- Стандартные цилиндрические пятикратные образцы для механических испытаний Ø 4 мм (ГОСТ 1497-84).

- Стандартные плоские пятикратные образцы для механических испытаний толщиной 3 мм (ГОСТ 1497-84).

- Плоские пятикратные микрообразцы для механических испытаний толщиной 1 и 2 мм.

Разделка на заготовки под образцы осуществлена электроэрозионным методом. Цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 4 мм 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.

Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине 1246-2/2300 при комнатной температуре и 350° С. Средние значения механических свойств приведены в табл. 2.

Из приведенных результатов видно, что значения предела прочности, предела текучести и относительного удлинения отличаются для стандартных образ-

цов и микрообразцов при температуре 20 и 350° С не более чем на 10 % и соответствуют значениям, приведенным в НТД (нормативно-технической документации) на сталь 10ГН2МФА и требованиям "Методики определения механических свойств металла трубопроводов АЭС с реакторами ВВЭР-1000 с помощью микрообразцов"[9-18].

**3.2. Ударная вязкость**

Образцы для определения ударной вязкости были изготовлены в соответствии с ГОСТ 9454-78 (образцы с V-образным концентратором тип 11, 13, 14). Из катушки ГЦТ (сталь 10ГН2МФА) были изготовлены также микрообразцы, отличающиеся от типа 14 толщиной (вместо 2 мм толщина 1 мм).

Размеры образцов в миллиметрах и результаты испытаний приведены в табл. 4.

Испытания на ударный изгиб проводили только при комнатной температуре, так как по ТУ 975Е004511 [19] испытания металла ГЦТ при высоких температурах не предусмотрены.

Результаты испытаний приведены в табл. 5. Видно, что значения ударной вязкости для образцов, изготовленных по ГОСТ 9454-78, отличаются:

для типа 11 и 13 в 1,17 раза

для типа 11 и 14 в 2,24 раза

для типа 11 и микрообразцов в 3 раза.

Несмотря на такое различие по ударной вязкости для образцов различного типа по сравнению с типом 11, принятым в атомной энергетике (ПНАЭ Г-7-002-86), использование микрообразцов может быть оправдано введением поправочного коэффициента, как это принято, например, при испытании на ударную вязкость образцов корпусной стали в РИЦ "Курчатовский институт".

**Таблица 2**

**Сравнение кратковременных механических свойств стандартных образцов и микрообразцов при 20° С**

Толщина образца или диаметр	$R^T_m$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$R^T_{P 0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	A, %	Z, %	Примечание
1 мм	57,5	43,0	28,0	68,0	Среднее по 3-м образцам
2 мм	58,0	44,0	26,5	72,0	То же
3 мм ГОСТ 1497-84	59,5	43,5	28,5	72,0	То же
Цилиндрические образцы Ø4 мм ГОСТ 1497-84	59,0	44,0	28,0		Среднее по 15 образцам
Максимальное отличие значений микрообразцов от стандартных образцов	2,5%	2%	6%	5%	
Данные НТД	55-65	35-50	≥16	≥ 55	ТУ 975Е004511, Ред. 5
"	55	35	16	55,0	ПНАЭ Г-7-002-86

**Таблица 3**

**Сравнение кратковременных механических свойств стандартных образцов и микрообразцов при 350° С**

Толщина образца	$R^T_m$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$R^T_{P 0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	A, %	Z, %	Примечание
1 мм	50,0	40,0	21,0	64,0	Среднее по 2-м образцам
2 мм	52,5	39,0	21,5	71,0	-
3 мм ГОСТ 1497-84	52,5	38,5	20,5	71,0	Среднее по 2-м образцам
Максимальное отличие значений микрообразцов от стандартных образцов	5%	+2%	+7,5%	10%	
Данные НТД	≥50	≥ 30	≥ 14	≥ 50	ТУ 975Е004511, Ред. 5
"	50	30	14	50	ПНАЭ Г-7-002-86

#### 4. ВЫРЕЗАНИЕ ТЕМПЛЕТА С ГЦТ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

При анализе технической документации было установлено, что наиболее приемлемым для вырезки является колено трубопровода петли № 1 главного циркуляционного трубопровода. При ультразвуковом контроле трубного блока № 4 было установлено, что толщина металла в районе сварного шва № 1 – 7 составляет не менее 80 мм при минимально допустимой толщине 63,1 мм по чертежу.

На основании вышеизложенного руководством ЮУ АЭС было утверждено техническое решение о проведении вырезки заготовок под образцы из основного металла трубного блока № 4 на расстоянии 200 мм ниже от сварного шва № 17 с размерами 60x60 с углублением в основной металл не более 7 мм.

На выбранном месте трубопровода был организован участок для вырезки, подведены коммуника-

ции для работы комплекса “Микрорез”.

Малогабаритный передвижной комплекс “Микрорез-5” предназначен для электроэрозионного вырезания проб металла с поверхности оборудования и трубопроводов без нарушения целостности изделий.

Для резания используется искровой импульсный разряд в диэлектрической рабочей жидкости.

Тип установки: передвижная блочно-модульная.

Установка "Микрорез" состоит из следующего оборудования и приспособлений (рис. 1): рабочей платформы, закрепляемой на трубопроводе с помощью гибких захватов, модуля оконтуривания места вырезки пробы, модуля электроэрозионного вырезания пробы, блока питания модулей, блока управления модулем электроэрозионного вырезания, системы водяного охлаждения установки.

Рабочая платформа имеет стойки для крепления модулей, стальные опоры для установки на трубе, окно для выполнения реза.

**Сравнение ударной вязкости для различных типов V-образных образцов, изготовленных из стали 10Г2НМФА (размеры образцов в миллиметрах)**

Вид концентратора	Радиус концентратора	Тип образца по ГОСТ 9454-78	Длина L (пред. откл. $\pm 0,6$ )	Ширина В	Высота Н (пред. откл. $\pm 0,6$ )	Высота Рабочего Сечения Н <sub>2</sub>	Ударная вязкость KCV кгс/см <sup>2</sup>
V	0,25 $\pm$ 0,025	11	55	10 $\pm$ 0,1	10	8 $\pm$ 0,05	27,1
		13	55	5 $\pm$ 0,05	10	8 $\pm$ 0,05	23,2
		14	55	2 $\pm$ 0,05	8	6 $\pm$ 0,05	12,1
		микро	55	1 $\pm$ 0,05	8	6 $\pm$ 0,05	8,8

Модуль оконтуривания содержит высокооборотный электродвигатель с насадкой для сменных абразивных кругов, закрепленный на жестком каркасе, системы микрометрической подачи в продольном и поперечном направлении, механизм поворота,

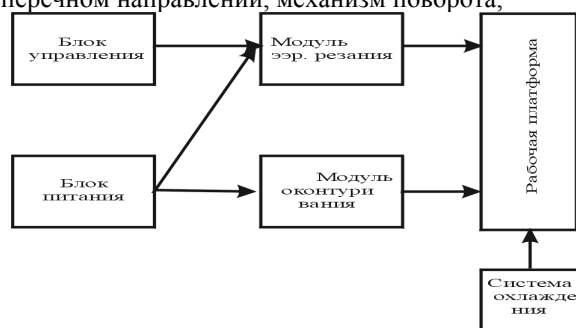


Рис. 1. Блок-схема установки "Микрорез-5".

систему контроля глубины контура и стопора максимальной глубины.

Система подачи и механизм поворота обеспечивают возможность проводить абразивное резание по квадратному контуру размерами 60х60 мм. Электродвигатель модуля оконтуривания питается от сети переменного тока напряжением 220 В, потребляемая мощность 0,5 кВт.

Модуль электроэрозионного резания содержит подающую и приемную катушки с латунной проволокой толщиной 0,15 мм, систему перемотки, опоры для размещения режущей части проволоки в контуре реза, механизм перемещения режущей части, ванну с рабочей жидкостью (вода), блок регистрации скорости резания.

Блок питания модуля содержит выпрямители для запитки двигателей перемотки и перемещения (24 В), генератор преобразования переменного тока промышленной частоты в униполярный импульсный ток регулируемой амплитуды, частоты и длительности импульсов.

Система управления и контроля содержит тумблеры включения-выключения электродвигателей, вольтметры контроля напряжения на проволоке, осциллограф для контроля импульсного электрического разряда.

Габаритные размеры вырезаемых проб металла: длина 60 мм, ширина 60 мм, толщина от 0,3 до 10 мм. Производительность установки – 1 проба указанных размеров за 24 ч. Напряжение питания: промышленная сеть, однофазная 220в  $\pm$  10% ~ 50 гц.

Потребляемая мощность 2 кВт. Рабочий электрод: проволока диаметром 0,15 мм. Рабочая жидкость - техническая вода.

Геометрические замеры, проведенные после вырезки пробы и демонтажа установки, показали, что глубина зарезки во всей зоне резания не превышает 4,5 мм при разрешенной техническим решением 7 мм.

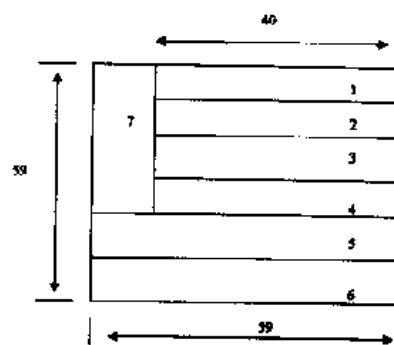


Рис. 2. Схема разделки темплета. 1-4 – заготовки под образцы для механических испытаний на растяжение 5, 6 – заготовки под образцы для испытаний на ударный изгиб 7 – заготовка под образцы для металлографических и структурных исследований.

Размеры вырезанной пробы металла составили: длина 59 мм, ширина 59 мм, толщина 2,5...4,2 мм.

По завершению работ в соответствии с техническим решением персоналом станции была произведена механическая зачистка места вырезки с обеспечением плавных переходов к основному металлу. Был выполнен контроль толщины стенки блока в месте вырезки, показавший, что минимальная толщина стенки ГЦТ составляет 81 мм (по чертежам должна быть не менее 63,1 мм). По завершению работ была выполнена цветная дефектоскопия.

Для выполнения целей и задач, возложенных на методику микрообразцов, необходимо выполнить следующую программу исследований основного металла ГЦТ 1-го блока ЮУ АЭС после 100·10<sup>3</sup>ч эксплуатации:

- определить прямыми методами механические свойства на растяжение (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение) при температурах 20 и 350<sup>0</sup>С (требования ТУ 975Е 004511);
- определить ударную вязкость при температуре 20<sup>0</sup>С (требования ТУ 975Е 004511);

- провести сравнительный анализ механических свойств, полученных прямыми методами с данными механических свойств, полученным по замерам твердости;

- выполнить комплекс структурно-фазовых и металлофизических исследований для оценки эволюции микроструктуры в процессе эксплуатации.

Темплет был шлифован на плоскошлифовальном станке с водяным охлаждением до толщины 2 мм. С учетом намеченной нами программы исследований

осуществлена разделка темплета, вырезанного с ГЦТ (см. рис. 2).

С целью максимального использования металла разрезка темплета осуществлялась электроэрозионным методом.

Из заготовок были изготовлены образцы:

- для механических испытаний с размерами рабочей части 15x3,5x2 мм;

- для испытаний на ударный изгиб тип 14 по ГОСТ 9454-78 2x8x55 мм с V-образным надрезом.

Химический состав стали по ТУ 975Е 004511, а

также фактический химический состав по сертификату поставщика труб (колена) приведены в табл. 5.

## 5. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Металлографические исследования, оценку микроструктуры, определение содержания примесных включений проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 5640-68, [21]. На рис. 3 показана характерная микроструктура металла ГЦТ после 100·10<sup>3</sup>ч эксплуатации.

Металлографический анализ стали 10ГН2МФА после эксплуатации показал, что содержание неметаллических включений в металле составляет: сульфиды – 1,5 балла, оксисульфиды или силикаты – 1...1,5 балла, нитриды, карбонитриды – 2 балла по шкалам нитридов точечных и 1 балл строчечных.

Микротвердость металла, измеренная как до травления металлографических шлифов, так и после выявления микроструктуры составляет 143...167 кг/мм<sup>2</sup> при нагрузке 20 г.; имеются отдельные участки с более высокой твердостью (до 211 кг/мм<sup>2</sup>).

Таблица 5

### Химсостав стали 10ГН2МФА

Условия	C	Si	Mn	Ni	Mo	V	S	P	Cr	Cu
Требуемый по ТУ975Е004511 (ред. 5)	0,08 0,12	0,17 0,37	0,70 0,90	1,70 2,00	0,40 0,60	- 0,04	- 0,020	- 0,020	- 0,30	- 0,30
Фактический по сертификату поставщика труб, колена, черт. 1117.22.00.500 номер детали 11	0,09	0,31	0,79	1,89	0,52	0,03	0,013	0,011	0,17	0,04

Сведения о термообработке гйба ГЦТ, с которого был вырезан темплет, приведены в табл. 6

Таблица 6

### Термообработка колена 1117.22.00.500 зав. № 11

Вид термообработки	Температура процесса, °С	Скорость нагрева, °С/мин	Выдержка, ч
Нормализация	900...910	0,9	3
Закалка в воду	810...820	1,1	3
Отпуск	650...660	0,9	8
Доп. отпуск проб	640...645	0,7	15
Отпуск	655...660	0,5	9 ч 40 мин

Микроструктура и твердость типичны для перлита (перлит – это эвтектоидная смесь феррита ( $\alpha$ -Fe) и цементита ( $Fe_3C$ )). Сопоставление с десятибалльной шкалой ГОСТа 8233-56 (Сталь. Эталоны микроструктуры) [20] дают основание определить микроструктуру как двухфазную, состоящую из перлита мелкопластинчатого и зернистого перлита точечного типа в отдельных зернах наследственного аустенитного зерна (светлые участки на темном фоне, рис. 3. Исходя из сравнения с эталонами (согласно

шкале 9 по ГОСТ 8233-56) зернистый перлит составляет приблизительно 30 на 70 % пластинчатого перлита. По степени дисперсности пластинчатый перлит соответствует 4...5 баллу по ГОСТ 8233-56 (с межплоскостным расстоянием до 1 мм).



Рис. 3. Микроструктура металла ГЦТ после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации. Увеличение 500

Металлографические исследования показали, что микроструктура архивного металла и микроструктура металла после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации мало отличаются и определяются изменением процентного содержания зернистого перлита в структуре.

В результате приведенных металлографических исследований можно сделать вывод, что длительная эксплуатация металла 10ГН2МФА в условиях ГЦТ привела к незначительным изменениям в микроструктуре, выраженной в увеличении процентного

содержания пластинчатой составляющей перлита. Однако эти изменения не должны приводить к существенному изменению механических свойств.

## 6. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Испытания образцов на растяжение проводили на универсальной испытательной машине 1246P2/2300 (производство НИКИМП). Испытания на растяжение были проведены на воздухе, при комнатной температуре и при  $350^\circ\text{C}$  в вакууме.

Диаграмма растяжения стали после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации по внешнему виду не отличается от исходного металла. Такая диаграмма 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. 7 и 8 приведены результаты механических испытаний отработавшего металла в сравнении с НТД:

- ПНАЭ Г-7-002-86
- ТУ 975004511 (Ред. 5)
- паспортом на исходный металл ГЦТ – (колесо чертеж 1117.22.00500)
- нашими результатами мех. испытаний исходного основного металла ГЦТ – стали 10ГН2МФА.

Таблица 7

Результаты механических испытаний при  $20^\circ\text{C}$  образцов основного металла ГЦТ (сталь 10ГН2МФА) 1-го блока ЮУАЭС после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации

Условие	Предел прочности $R_m^T$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Предел текучести $R_{p0,2}^T$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение А, %	Относительное сужение, Z, %
	н е м е н е е			
ПНАЭ Г-7-002-86	55	35	16	55
ТУ 975 Е004511. Ред. 5	55-65	35-50	$\geq 16$	$\geq 55$
Паспорт на колесо ГЦТ	57,4	41,9	29,4	75,6
Результаты испытаний архивного металла	59,0	44,0	28,0	75,0
Результаты испытаний металла после $100 \cdot 10^3$ ч эксплуатации	60,7	46,2	27,3	74,7
Изменение свойств отработавшего металла по отношению к паспортным данным	+ 5,8 %	+ 10,3 %	7,1 %	1,2 %
Изменение свойств отработавшего металла по отношению к архивному металлу	+ 3 %	5 %	2,5 %	0,4 %

Сравнение полученных результатов, их анализ свидетельствуют о том, что механические свойства металла ГЦТ после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации соответствуют данным нормативно-технической документации.

По отношению к паспортным данным и результатам испытаний исходного металла обнаружена тенденция к упрочнению после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации и снижению пластичности. При этом предел текучести отработавшего металла увеличился больше, чем предел прочности.

Исследованы также поверхности излома образцов (фрактография) после испытаний. Исследования проводили на электронном микроскопе JEMCX при помощи растровой приставки ASID-4D при ускоряющем напряжении 40 кВ.

Фрактографические исследования характера разрушения образцов после испытания на растяжение свидетельствуют о том, что при температуре  $20$  (рис. 4) и  $350^\circ\text{C}$  (рис. 5) материал разрушился вязко, в нем отсутствуют элементы хрупкого излома, усталостные бороздки не наблюдаются[22,23].

Результаты механических испытаний при 350°С образцов основного металла ГЦТ (сталь 10ГН2МФА) 1-го блока ЮУАЭС после 100·10<sup>3</sup> ч эксплуатации

Условие	Предел прочности R <sup>r</sup> <sub>m</sub> , кгс/мм <sup>2</sup>	Предел текучести R <sup>r</sup> <sub>p0,2</sub> , кгс/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение A, %	Относительное сужение Z, %
	н е м е н е е			
ПНАЭ Г-7-002-86	50	30	14	50
	н е м е н е е			
ТУ 975 Е004511. Ред. 5	50	30	14	50
Паспорт на колено ГЦТ	52,3	31,9	25,3	71,8
Результаты испытаний исходного металла	52,5	39,0	26,5	71,0
Результаты испытаний металла после 100·10 <sup>3</sup> ч эксплуатации	55,6	40,4	22,5	72 %
Изменение свойств отработавшего металла по отношению к паспортным данным	+ 6,3 %	+ 26,6 %	11 %	+ 0,2 %
Изменение свойств отработавшего металла по отношению к исходному	+ 5,9 %	+ 3,6 %	+ 15,4 %	+1,4 %

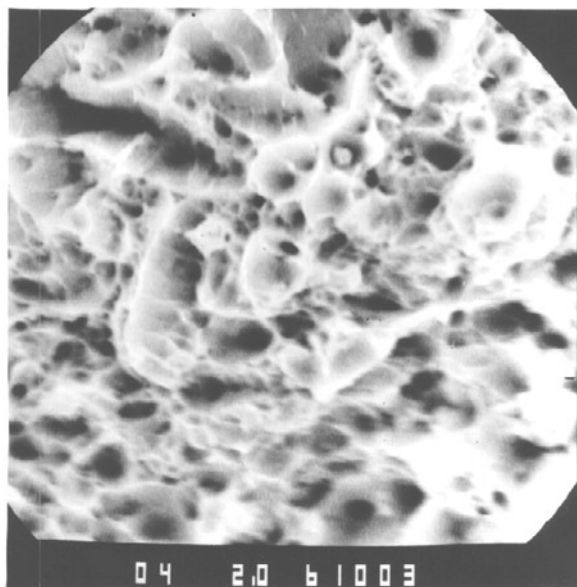


Рис. 4. Характер разрушения образцов стали 10ГН2МФА после механических испытаний при 20°С после 100·10<sup>3</sup> ч эксплуатации в 1-м блоке ЮУАЭС, х 2000.

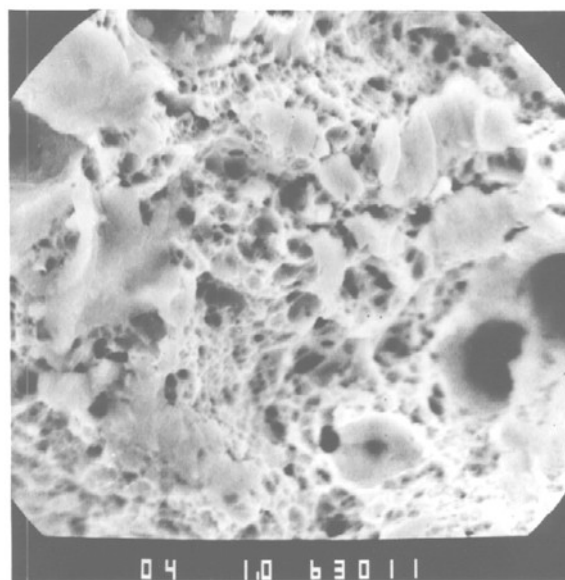


Рис. 5. Характер разрушения образцов стали 10ГН2МФА после механических испытаний при 350°С после 100·10<sup>3</sup> ч эксплуатации в 1-м блоке ЮУАЭС, х 1000.

### 7. ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ

Для испытаний на ударную вязкость использовали маятниковый копер ПСВ-30 (производство Германии). Испытания на ударный изгиб проводили при комнатной температуре, так как в ТУ и паспорте приведены данные только при 20°С.

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 реактора на испытания на ударный изгиб, необходимо вводить поправочные коэффициенты, позволяющие откорректировать полученные результаты на данные, которые были бы получены при испытании образцов типа 11. В разд. 3 мы уже обсуждали этот вопрос, поэтому мы воспользуемся результатами, полученными при испытании исходного металла. На рис. 6 приведены результаты испытаний на ударную вязкость образцов исходной стали 10ГН2МФА (верхняя кривая).

Из металла, отработавшего 100·10<sup>3</sup>ч, были изготовлены образцы типа 14 (2x8x55 мм). Их ударная

вязкость по результатам испытаний составила 9,65 кгс/см<sup>2</sup>. Обратим внимание на то обстоятельство, что полученное значение выше значения KCV, заложенного в ТУ 975E004511 (ред. 5) для образцов типа 11 ( $\geq 4,8$  кгс/см<sup>2</sup>). С учетом поправочных коэффициентов, приведенных в разд. 3, значение ударной вязкости для образцов типа 11 по нашим данным составляет 21,6 кгс/см<sup>2</sup>, тогда как по паспорту на колесо ГЦТ KCV равно 21,0 кгс/см<sup>2</sup>. Следовательно, ударная вязкость для стали 10ГН2МФА после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации практически не изменилась.

Фрактографические исследования места разрушения образца после испытаний на ударный изгиб свидетельствуют о его вязком характере разрушения (рис. 7)

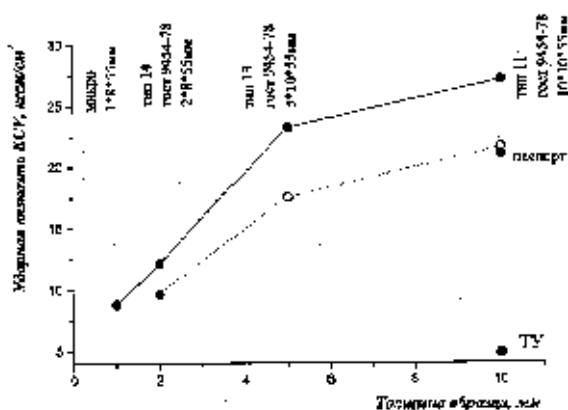


Рис. 6. Результаты испытаний стали 10ГН2МФА на ударный изгиб. Верхняя кривая — исходный металл. Нижняя кривая — после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации.

## 8. ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

Измерение твердости — самый доступный и распространенный метод контроля металла. Это объясняется простотой и экспрессностью измерений, что позволяет выполнить большой объем контроля. Метод является неразрушающим методом испытаний.

Измерение твердости при вдавливании в испытуемый металл более твердого индентора получило наиболее широкое распространение (измерение твердости по Бринелю, Роквеллу или по Викерсу). При измерении твердости этими методами в испытуемый металл под действием определений нагрузки вдавливается твердый индентор и значения твердости определяются по размерам (глубине или площади) образующегося отпечатка. Внедрение индентора вызывает значительную деформацию (~30...40 %). Поэтому твердость при вдавливании индентора характеризует сопротивление металла большим пластическим деформациям в условиях объемного неравномерного сжатия.

Известно много попыток установить корреляцию между твердостью и механическими свойствами при растяжении. Наиболее обоснованными с физической точки зрения следует признать те из них, в которых определяется связь между твердостью и характеристиками сопротивления большим пластическим деформациям, например пределом прочности при испытании на растяжение. Действительно, получены

эмпирические формулы вида

$$R_m = aH + b,$$

где  $R_m$  — предел прочности;  $H$  — твердость,  $a$  и  $b$  — коэффициенты, зависящие от природы и структурного состояния металла.

Пользуясь подобными эмпирическими зависимостями, можно приблизительно оценивать механические свойства по результатам измерения твердости, однако необходимо помнить об их условности. Эти зависимости не учитывают в полной мере различий в напряженном состоянии при вдавливании индентора и при растяжении, поэтому приведенные выше формулы дают сравнительно точные результаты только в определенном (обычно узком) диапазоне структурных состояний и условий испытаний.

Измерения твердости проводили на приборе ТК-2М, ГОСТ 13407-67[24]. В качестве индентора использовался стальной шарик, определялся HRB.

Измерения проводили на исходном металле и металле, отработавшем  $100 \cdot 10^3$  ч.

Сравнение результатов измерений показывает, что твердость исходного металла и металла, отработавшего в 1-м блоке ЮУ АЭС  $100 \cdot 10^3$  ч совпадает. Разброс значений твердости в обоих случаях не превышает  $\pm 3,5$  %, что достаточно хорошо для метода твердости.

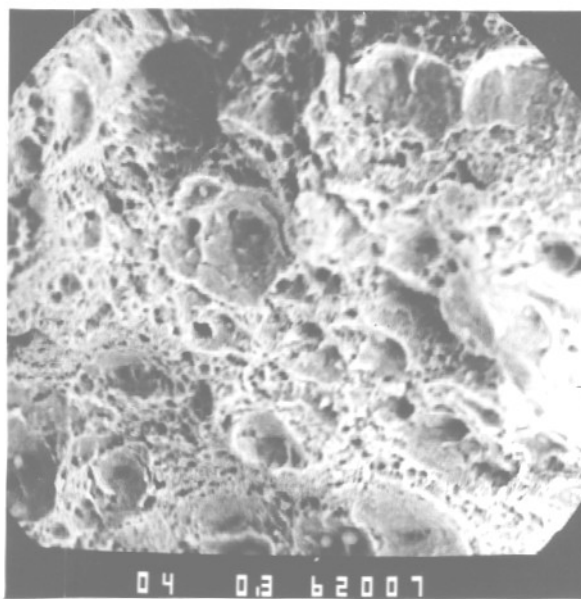


Рис. 7. Характер разрушения образцов стали 10ГН2МФА после испытаний на ударную вязкость при 20°С после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации в 1-м блоке ЮУ АЭС, х 300.

Отметим, что исследования твердости по толщине исходной катушки ГЦТ показали, что в указанных пределах твердость по толщине одна и та же (за исключением зоны термического влияния наплавки).

В соответствии с разработанной ВНИИАЭС инструкцией РД ЭО 0027-94 [25] “Определение характеристик механических свойств оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости” проведен расчет механических свойств стали 10ГН2МФА (таблица 9)



по среднему значению твердости. Здесь же для сравнения приведены результаты прямых испытаний механических свойств исходного металла ГЦТ, металл-

ла ГЦТ после  $100 \cdot 10^3$ ч эксплуатации и паспортные данные на колено ГЦТ, из которого был вырезан темплет.

Таблица 9

Расчет механических свойств стали 10ГН2МФА по твердости\* и их сравнение с результатами испытаний

Характеристика	Расчет по твердости	Механические свойства при измерении				Паспорт на колено	
		исходный металл	отличие от расчета, %	после 100 тыс.	отличие от расчета, %		
$R_m$ кгс/мм <sup>2</sup>	58,5	59,0	+ 1 %	60,7	+ 4 %	57,4	- 2 %
$R_{0,2p}$ кгс/мм <sup>2</sup>	54,0	44,0	- 18,5 %	46,2	- 14,4 %	41,9	- 22 %
A, %	24,5	28,0	+ 14,2 %	27,3	+ 11,5 %	29,4	+ 20 %

- . Из приведенных в таблице. данных видно, что
- предел прочности, вычисленный по твердости, достаточно хорошо (в пределах  $\pm 4$  %) совпадает с результатами, полученными на исходном металле, металле, отработавшем  $100 \cdot 10^3$ ч, и паспортными данными на металл ГЦТ;
  - предел текучести, вычисленный по твердости значительно выше (от 14 до 22 %) от значений, полученных прямым методом (по РД ЭО 0027-94 разд. 5 погрешность вычислений не должна превышать 10 %);
  - относительное удлинение, вычисленное по твердости, ниже (от 11 до 20 %) от значений, полученных прямым методом (по РД ЭО 002794 для характеристик пластичности погрешность не более 20 %).

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующее заключение:

- твердость является экспрессным безобразцовым методом, позволяющим выполнить большой объем контроля;
- результаты определения механических свойств по данным измерения твердости носят условный характер и, главным образом, качественно отражают ситуацию об изменениях механических свойств и эволюции структуры металла в процессе эксплуатации.

## 9. ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электронно-микроскопическое исследование структуры образцов проводилось на электронном микроскопе JEM-100СХ, оборудованном гониометром бокового типа, при ускоряющем напряжении 100 кВ.

Идентификация выделений второй фазы и кристаллографических направлений решетки проводилась в режиме микродифракции [26].

Исходный материал в результате заводской термообработки имел структуру феррита с выделениями зернистого и пластинчатого цементита ( $Fe_3C$ ). Структура исходного материала представлена на рис. 8. Средний размер зерен феррита равен  $10 \dots 15$

мкм. Внутри зерен наблюдаются субзерна размерами около 3 мкм. В теле ферритного зерна присутствуют мелкодисперсные пластинчатые выделения, идентифицированные как  $Fe_3C$ . Средняя плотность подобных выделений равна  $1,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

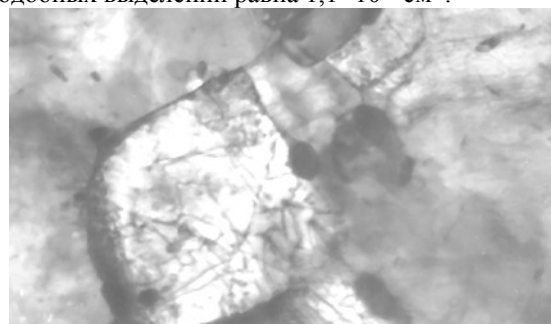


Рис. 8. Микроструктура исходного материала ( $\times 80\ 000$ )

Структура металла главного циркуляционного трубопровода 1-го энергоблока ЮУАЭС, эксплуатировавшегося в течении  $100 \cdot 10^3$ ч, приведена на рис. 10.

Размеры зерна и зернистого цементита не изменились по сравнению с исходным материалом. Распределение выделений по размерам, не претерпевшее заметного изменения, приведено на гистограмме рис. 9. Плотность выделений в теле зерна составляет  $1,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Кроме того, отмечено возникновение доли карбидных прослоек на межзеренной границе, вследствие возможной сегрегации на нее углерода.

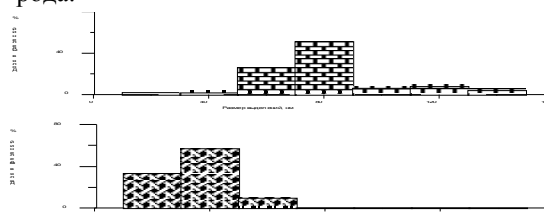


Рис. 9. Гистограмма распределения внутризеренных выделений по размерам в материале, отработавшем  $100 \cdot 10^3$  ч

## 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

Метод внутреннего трения является одним из самых чувствительных методов исследований, позволяющих выявлять изменения структурно-фазового состояния материалов на самых ранних стадиях. Исследования природы хрупкости и межкристаллитной внутренней адсорбции примесей приведены в работах [27-29]. Для сталей типа 15Х2НМФА с содержанием фосфора ~ 0,011 вес. % известен «фосфорный пик», появляющийся при ~ 300°С при изучении температурной зависимости внутреннего трения.

Учитывая влияние длительного отжига на процессы охрупчивания стали, обусловленные изменением концентрации фосфора на границах зерен, и зависимость параметров примесного фосфорного пика от концентрации фосфора на границах зерен, проведено изучение температурной зависимости внутреннего трения стали 10ГН2МФА после длительной эксплуатации в реакторных условиях.

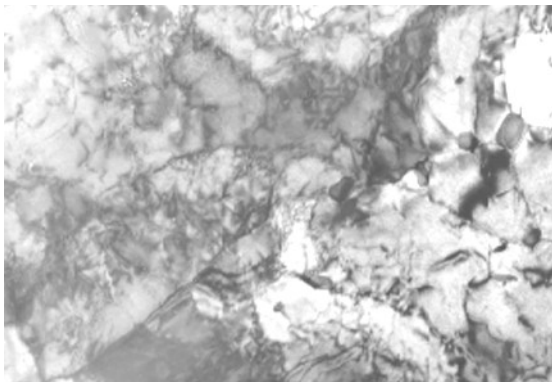


Рис. 10. Микроструктура материала трубопровода после 100 000 ч эксплуатации ( $\times 70\ 000$ )

Изучение внутреннего трения проводилось на образцах из стали 10ГН2МФА в исходном состоянии и после эксплуатации в течение  $100 \cdot 10^3$  ч. Размеры образцов составляли 1x2x40 мм, резонансная частота крутильных колебаний 8 Гц. Испытания проводились на установке обратного крутильного маятника в вакууме при нагреве до 350°С. Температурная зависимость внутреннего трения  $Q^{-1}(T)$  стали в исходном состоянии и после эксплуатации в течение  $100 \cdot 10^3$  ч представлена на рис. 11, точками (О,Δ), соответственно. На кривых  $Q^{-1}(T)$  наблюдаются два максимума  $Q^{-1}$  при 100 и 310°С. Пик  $Q^{-1}$  при 100°С обусловлен релаксацией Снука-Кестра (СК) вызываемый внедренными атомами углерода в твердом растворе внедрения [30, 31]. Второй максимум  $Q^{-1}(T)$  при 310°С относится к фосфорному примесному пику (ПП) возникающему в результате адсорбции фосфора на границах зерен [29, 32, 33].

На рис. 11 высота пика  $Q^{-1}(T)$  при 100°С для стали после эксплуатации в течение  $100 \cdot 10^3$  ч незначительно изменилась, а для пика  $Q^{-1}(T)$  при 310°С возросла по сравнению с высотой пика для стали в исходном состоянии.

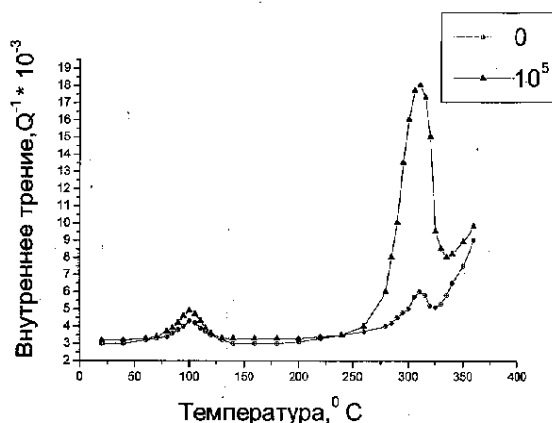


Рис. 11. Температурная зависимость внутреннего трения.

Полученные экспериментальные результаты по росту  $Q^{-1}(T)$  при 310°С свидетельствуют о значительных изменениях в состоянии границ зерен. Эти оценки основываются на литературных данных, однако они позволяют при совместном теоретическом и экспериментальном определении необходимых параметров прогнозировать работоспособность стали в реальных условиях эксплуатации.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что на первом этапе эксплуатации стали за  $100 \cdot 10^3$  ч произошло снижение показателей пластичности и при этом значительное возрастание пика внутреннего трения, обусловленное процессами старения и увеличением концентрации фосфора на границах зерен. Приведенный анализ показывает, что концентрация фосфора на границах зерен еще не достигла критического значения, близкого к насыщению, и дальнейшее обогащение должно быть более замедленным, чем на начальных этапах эксплуатации стали. Для установления корреляции между характеристиками пластичности, концентрацией фосфора на границах зерен и высотой пика внутреннего трения при 310°С необходимы дополнительные измерения внутреннего трения стали 10ГН2МФА через последующие 20...30 тыс. часов эксплуатации.

## 11. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Комплекс работ, выполненных при исследовании темплета, вырезанного с основного металла ГЦТ первого блока ЮУ АЭС после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации, включая

- механические испытания на растяжение;
- ударную вязкость;
- металлографические исследования;
- фрактографические исследования;
- электронно-микроскопические исследования;
- исследование внутреннего трения;
- измерения твердости и микротвердости

позволяет проанализировать эволюцию свойств и структуры стали 10ГН2МФА за  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации.

1. Механические свойства стали на растяжение (предел прочности, предел текучести, относитель-

ное удлинение, относительное сужение), ударная вязкость, содержание неметаллических включений соответствуют НТД на сталь 10ГН2МФА (ПНАЭ Г-7-002-86, ТУ 975Е004511). Разрушение образцов носит вязкий характер.

2. Вместе с тем для металла, отработавшего  $100 \cdot 10^3$  ч наблюдается тенденция к старению, происходит эволюция структуры. Об этом свидетельствует

- более существенное увеличение предела текучести, чем предела прочности на отработавшем металле, сопровождающееся потерей пластичности;
- увеличение  $310^0$  С пика внутреннего трения на отработавшем металле по сравнению с исходным.

Теоретический анализ и оценки также дают основание считать, что при параметрах эксплуатации реактора ВВЭР-1000 в стали 10ГНМФА (ГЦТ, дыхательный трубопровод, трубопроводы САОЗ) происходят процессы старения. В этом анализе основное внимание уделено изучению сегрегации фосфора на межзеренных границах и влиянию на этот процесс примесей молибдена. Из литературных данных известно, что примеси, особенно фосфор, влияют на охрупчивание сталей, скапливаясь (сегрегация) на межзеренных границах. Несмотря на приблизительность подобных оценок, обусловленных незнанием в изучаемой температурной области коэффициентов диффузии и коэффициентов перераспределения примесей у межзеренных границ, полученные результаты позволяют определить основные закономерности процесса.

Результаты проведенных исследований и оценок показали:

- в течение первых  $200 \cdot 10^3$  ч эксплуатации (назначенный ресурс реакторной установки ВВЭР-1000) сталь 10ГН2МФА приходит в состояние, близкое к равновесному. Это означает, что если при  $200 \cdot 10^3$  ч эксплуатации механические свойства стали соответствуют НТД, то в дальнейшем они должны мало меняться;
- температура эксплуатации существенно влияет на диффузионные процессы. Например, при температуре  $300^0$  С коэффициент диффузии фосфора в 5 раз меньше, чем при  $325^0$  С.

В силу сложившихся обстоятельств, вырезка темплеты была проведена на “холодной” нитке ГЦТ, поэтому на металле “горячей” нитки следует ожидать более существенных изменений механических свойств и эволюции структуры.

3. Метод твердости может использоваться для контроля механических свойств металла, находящегося в эксплуатации как экспрессный метод, позволяющий выполнить большой объем контроля, однако он должен применяться в сочетании с вырезкой микротемплетов или “трепанов” для обоснования его использования как метода контроля механических свойств металла после различных сроков эксплуатации или материалов, работающих в условиях облучения (например, корпус реактора).

4. Полученные нами результаты целесообразно

сравнить с результатами механических свойств и структурного состояния металла, полученными на трубопроводах энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС (ВВЭР-1000) после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации. Здесь контроль проводился на базе безобразцовой технологии с целью определения воздействия эксплуатационных факторов на старение металла [9].

Определение механических свойств производили по результатам измерения твердости согласно методике РД ЭО 0027-94. Определялись в местах контроля предел прочности, предел текучести, относительное удлинение.

Безобразцовый металлографический контроль осуществлялся методом реплик. Реплика ставилась в зоне измерения твердости.

Полученные указанными методами результаты дали основание сотрудниками ВНИИАЭС сделать следующий вывод:

“Комплекс работ, проведенный на широком диапазоне марок материалов, показал, что эксплуатационное воздействие при заданных параметрах эксплуатации в течение  $100 \cdot 10^3$  ч не оказывает влияния на механические свойства исследованных марок материалов. Показатели механических свойств находятся в соответствии с требованиями нормативной документации. Не отмечено также структурных изменений в металле.”

Метод кинетической твердости, частично использованный в этих работах, суть которого заключается в регистрации процесса вдавливания индентора в координатах: “нагрузка на индикатор – глубина внедрения индентора в поверхность исследуемого материала” является существенным продвижением метода твердости. Здесь осуществлен переход от регистрации лишь конечного результата (в “классической твердости”) к изучению всей кинетики процесса упругопластического деформирования вдавливанием индентора. Тем не менее конечный результат метода кинетической твердости, как и классической твердости – это оценка механических свойств (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение), и погрешность определения этих свойств мало зависит от того, записывается ли диаграмма вдавливания индентора или нет. Метод кинетической твердости не ликвидирует главный недостаток метода твердости как метода определения механических свойств металла на растяжение – это косвенный метод оценки механических свойств в специфическом напряженном состоянии, реализуемом при вдавливании индентора.

Получаемые эмпирические соотношения между твердостью и механическими свойствами верны в узком структурном интервале. Поэтому для контроля механических свойств металла после длительной эксплуатации метод твердости может использоваться в сочетании с методикой микрообразцов или вырезок.

В самом деле, как следует из наших результатов, использование только методов твердости и металлографии дает основание считать, что свойства стали 10ГН2МФА после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации не изме-

нились, что соответствует выводам работы [20]. И только использование современных методов исследований с использованием образцов (электронной микроскопии, внутреннее трение, прямые методы механических испытаний) позволило выявить тенденцию к старению в процессе эксплуатации в ГЦТ энергоблока № 1 ЮУ АЭС.

5. Изложенные в настоящей статье возможности и преимущества метода микрообразцов для контроля эволюции свойств металла в процессе эксплуатации и оценки остаточного ресурса оборудования и трубопроводов АЭС на примере основного металла главного циркуляционного трубопровода энергоблока № 1 ЮУ АЭС свидетельствуют о перспективности данной методики при проведении работ на энергоблоках как при разовых, так и при систематических периодических обследованиях. Выполнение таких работ должно проводиться специализированными предприятиями, нацеленными на постоянное выполнение таких работ (например, ДП “Энергоатом контроль-сервис”).

## 12. ВЫВОДЫ

1. Для выполнения контроля механических свойств основного металла главного циркуляционного трубопровода первого энергоблока ЮУ АЭС после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации (требования п. 7.6.3 ПНАЭ Г-7-008-89) решены следующие основные задачи:

- разработана система контроля механических свойств с использованием микрообразцов;
- разработана методика и пилотный вариант оборудования для вырезки заготовок под микрообразцы без нарушения конструкционной целостности и прочности трубопроводов;
- для стали 10ГН2МФА обосновано соответствие результатов механических испытаний микрообразцов результатам испытаний стандартных образцов;
- проведена аттестация методики, ее согласование с ГАЯР и утверждение в НАЭК “Энергоатом”.

2. В системе контроля механических свойств основного металла и сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС с помощью микрообразцов реализован комплексный подход. Определяются:

- механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение);
- ударная вязкость;
- характер разрушения образцов;
- микроструктурные и структурно-фазовые изменения в процессе эксплуатации;
- твердость и микротвердость;
- состояние границ зерен, ответственных за процессы охрупчивания материалов;
- наличие межкристаллитной коррозии (для аустенитных сталей).

3. Впервые проведена вырезка темплета основного металла из ГЦТ 1-го энергоблока ЮУ АЭС после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации при сохранении конструкционной целостности и прочности трубопровода.

Вырезка выполнена с помощью установки “Ми-

крорез-5” (разработка НИЦ ХФТИ и ДП ЭАКС). Испытания установки “Микрорез-5” на 1-м энергоблоке ЮУ АЭС подтвердили правильность принципиальных технических решений (блочное-модульное изготовление, крепление к трубопроводу с помощью гибких захватов, совмещение систем оконтуривания и электроэрозионной резки, системы управления и контроля скорости электроэрозионного резания и др.).

Накопленный опыт и результаты испытаний позволяют приступить к разработке и изготовлению промышленного варианта установки “Микрорез” и внедрению ее для выполнения важнейших работ по оценке остаточного ресурса оборудования и трубопроводов АЭС и на других объектах промышленности.

4. Из вырезанного основного металла ГЦТ темплета изготовлены образцы и проведены исследования:

- определены механические свойства на растяжение (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение) при температурах 20 и  $350^{\circ}\text{C}$ ;
- ударной вязкости ( $20^{\circ}\text{C}$ );
- фрактографические исследования мест разрушения образцов после испытаний;
- металлографии;
- твердости и микротвердости;
- электронной микроскопии;
- внутреннего трения.

5. Результаты проведенных исследований показали, что механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение), ударная вязкость стали 10ГН2МФА после  $100 \cdot 10^3$  ч эксплуатации соответствуют нормативно-технической документации.

6. Анализ полученных результатов, их сравнение с результатами испытаний исходного материала и паспортными данными свидетельствуют об имеющемся месте в стали 10ГН2МФА процессах старения металла в условиях эксплуатации.

7. Целесообразно при достижении  $(120 \dots 130) \cdot 10^3$  ч с начала эксплуатации выполнить повторную вырезку и испытания образцов металла ГЦТ первого энергоблока ЮУ АЭС с целью установления кинетики старения основного металла (сталь 10ГН2МФА) и прогнозирования остаточного ресурса металла ГЦТ как первого блока ЮУ АЭС, так и других энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000.

8. Проведенные исследования свидетельствуют о перспективности использования методики микрообразцов при проведении контроля механических свойств и эволюции структуры как при разовых, так и периодических обследованиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭ Г-008-89. “Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок”.
2. МИ 1317-86. “Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности

- измерений”.
3. Трубопровод главный циркуляционный. Спецификация конструкционных материалов 320.04.00.00.000 Д42.
  4. Методика определения механических свойств металла оборудования и трубопроводов АЭС с помощью микрообразцов. РД.00.ЭК.ХФ.МО.М. 09-09.
  5. ГОСТ 1497-84. “Металлы. Методы испытаний на растяжение”.
  6. ГОСТ 9454-78. “Металлы. Методы испытаний на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах”.
  7. I.M. Neklyudov, L.S. Ozhigov. Use of Microspecimens Irradiated in charged particle accelerators and Reactors for studying Mechanical Properties of Materials. Proceedings IEA International Symposium “Miniaturized Specimens for Testing of Irradiated Materials” Julich, Germany, 1994, p. 15-29.
  8. Л.С. Ожигов, И.М. Неклюдов, В.М. Пышный. Использование микрообразцов для оценки ресурса металла оборудования АЭС//*ВАИТ. Серия ФРП и РМ*, 1998. Вып. 6 (72). С. 85-89.
  9. А.А. Абагян, М.Б. Бакиров, В.Г. Васильев, Ю.А. Янченко. Контроль состояния металла оборудования и трубопроводов АЭС России после длительной эксплуатации//*Труды 5-й Международной конференции “Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”*. Т. 2. С-Петербург, 1998. С. 266-276.
  10. V. Cihal, Stahe u. Eisen., 1959,79,1944
  11. Foundry Trade J., 1969,16,92
  12. Jons and Laughlin Steel Corporation, Publicity Leaflet
  13. Baumel, ibid., 1965,85,1462
  14. E. Houndremont, Handluchder Sonder-stahlkunde, vol. 1, 1956.
  15. M. Semchyshen, A.P. Bond and H.J. Dundas, “Towards improved ductility and toughness”, Climax Molibdenium Co. Symp., Kyoto, 1972, 239.
  16. P.N. Wright, Welding J., Oct. 1971.
  17. F.V.Pickering, Heat Tretment 73, Metals Soc., 1975, 1.
  18. P.J. Goodhew B.Sc.,Ph.d., A.I.M., Specimens preparation in materials science, American elsevier publishing Co., INCNEW YORK, 27.
  19. Трубы бесшовные плакированные. Технические условия ТУ975Е004511. Ред. 5.
  20. ГОСТ 8233-56. “Сталь. Эталоны микроструктуры”.
  21. ГОСТ 5640-68. “Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты”.
  22. П. Хирш, А. Хови, Р. Никлсон, Д. Пэшли, М. Уэлан, *Электронная микроскопия тонких кристаллов*, М.: “Мир”, 1968, 48с.
  23. Л.В. Барханова, Э.Л. Демина, *Металлографическое травление металлов и сплавов*, М.: “Металлургия”, 1986, 35с.
  24. ГОСТ 13407-67. “Измерение твердости”.
  25. Инструкция РДЭО 0027-94 “Определение характеристик механических свойств металла оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости”.
  26. F.V.Pickering, Iron and Steel Inst. Publ. 114, 1969, 119.
  27. Краткий справочник физико-химических величин, Химия, 1967, 165с.
  28. А.А. Астафьев, Г.С. Карк, С.И. Марков. Фосфорный пик внутреннего трения в перлитной стали//*ФММ*, 1978, т. 45, вып. 1, с. 197-199.
  29. Е.Э. Гликман, Ю.В. Гранин, Ю.В. Пигузов. Исследование природы обратимой отпусковой хрупкости сталей методом внутреннего трения//*Металловедение и техническая обработка металлов*. 1967, № 4, с. 310.
  30. Е.Э. Гликман, Ю.В. Пигузов. Межкристаллитная внутренняя адсорбция примесей и внутреннее трение металлических твердых растворов и сплавов на их основе//*Аналитические возможности метода внутреннего трения*, М.: “Наука”, 1973, с. 75-86.
  31. М.С. Блантер, Ю.В. Пигузов. *Метод внутреннего трения в металлических исследованиях*, 1991.
  32. В.Т. Шматов, А.В. Гринь, ФММ, 1959, 8, в. 6, 829.
  33. А. Новик, Б. Бегри. *Релаксационные явления в кристаллах*, М.: “Атомиздат”. 1975.