

Раздел второй
**МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ
НА ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

УДК 621.039:620.17:620.186:620.187

**ЭВОЛЮЦИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ГЦТ «ГОРЯЧЕЙ»
И «ХОЛОДНОЙ» НИТОК ЭНЕРГООБЛОКОВ
ЮЖНО-УКРАИНСКОЙ АЭС В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ
НА ПРОТЯЖЕНИИ 200 ТЫСЯЧ ЧАСОВ**

*В.Н. Воеводин¹, А.С. Митрофанов¹, С.В. Гоженко¹, Е.А. Крайнюк¹, Р.Л. Василенко¹,
А.В. Бажуков², А.Н. Палий², П.Е. Мельник²*

¹*ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина;*

²*ОП «Южно-Украинская АЭС», Южноукраинск, Украина*

Исследованы микроструктура и механические свойства стали 10ГН2МФА главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) АЭС с ВВЭР-1000 после 200 тыс. ч эксплуатации. Были применены металлографические методы, электронная микроскопия, проведены механические статические и ударные испытания. Полученные результаты сопоставлены с результатами по образцам металла ГЦТ после 100 тыс. ч эксплуатации. Выявлены признаки старения металла, вероятной причиной которого могут служить эксплуатационные факторы и процессы, протекающие на микроструктурном уровне. На примере ГЦТ показано, что маломасштабные вырезки металла достаточно информативны в плане контроля структуры и механических свойств металла оборудования и трубопроводов АЭС.

ВВЕДЕНИЕ

Задачей атомной энергетики на современном этапе является продление сроков эксплуатации действующих энергоблоков АЭС. Особенно актуальной эта задача является для Украины. В работе [1] рассматривались вопросы состояния металла главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) в связи с продлением эксплуатации после 200 тыс. ч энергоблока №1 с ВВЭР-1000 на Южно-Украинской АЭС. Ранее были исследованы свойства металла ГЦТ после 100 тыс. ч эксплуатации на Южно-Украинской, Запорожской и Ровенской АЭС. Опубликованные результаты исследований показали, что механические свойства металла после 100 тыс. ч эксплуатации удовлетворяют требованиям нормативной документации. В то же время были выявлены некоторые изменения в структуре, а результаты испытаний показали признаки старения металла [1–4].

Целью настоящей работы является сравнительный анализ результатов исследований состояния металла ГЦТ первого и второго блоков на ЮУ АЭС и уточнение характера изменения структуры и свойств металла ГЦТ после эксплуатации на протяжении 200 тыс. ч.

МЕТОДИКА

Методика исследований была описана ранее [1]. Существенное отличие состояло в том, что темплеты для исследований были срезаны не с «холодной нитки», как в случае первого энергоблока (1-ГЦТ, температура 288 °С), а с «горячей нитки» второго энергоблока (2-ГЦТ, температура 320 °С).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований были определены характер микроструктуры металла, микротвердость, загрязненность неметаллическими включениями, механические свойства и ударная вязкость. На нетравленных шлифах обнаружены глобулярные и сложные включения типа оксидов и силикатов. Загрязненность металла, определенная по ГОСТ 1778-70 [5], соответствует 3-му баллу по шкалам точечных оксидов и недеформированных силикатов. Размеры частиц включений – 10...30 мкм. В наиболее загрязненных местах в поле зрения микроскопа при увеличении ×100 наблюдаются скопления из 5–7 частиц. Встречаются также частицы силикатов размером до 100 мкм. Различий в степени загрязненности металла ГЦТ на первом и втором блоках не выявили. После эксплуатации 100 тыс. и 200 тыс. ч загрязненность металла в обоих случаях такая же, как и в неработавшем (исходном) металле, и не выходит за пределы технических условий.

На рис. 1 приведены микроструктуры стали 10ГН2МФА в ГЦТ на 1-м и 2-м блоках ЮУ АЭС до и после эксплуатации 100 тыс. и 200 тыс. ч.

Оценка микроструктуры проводилась согласно [6]. Микроструктура металла обоих ГЦТ состоит в основном из зернистого перлита. После эксплуатации заметно увеличение содержания пластинчатого перлита. Микроструктура сталей 1-ГЦТ и 2-ГЦТ различается величиной зерна. В обоих случаях микроструктура удовлетворяет требованиям нормативной документации [7], согласно которым величина зерна не должна превышать 90 мкм (4 балл по ГОСТ 5639-82 [8]). В первом случае зерно заметно крупнее, чем во

втором. В табл. 1 приведены значения среднего условного размера зерен $d_{ср}$ в металле ГЦТ первого и второго блоков (1-ГЦТ и 2-ГЦТ) в исходном состоянии и после эксплуатации 100 тыс. и

200 тыс. ч. Также указаны значения микротвердости H , измеренной при нагрузке на индентор $P = 50$ г.

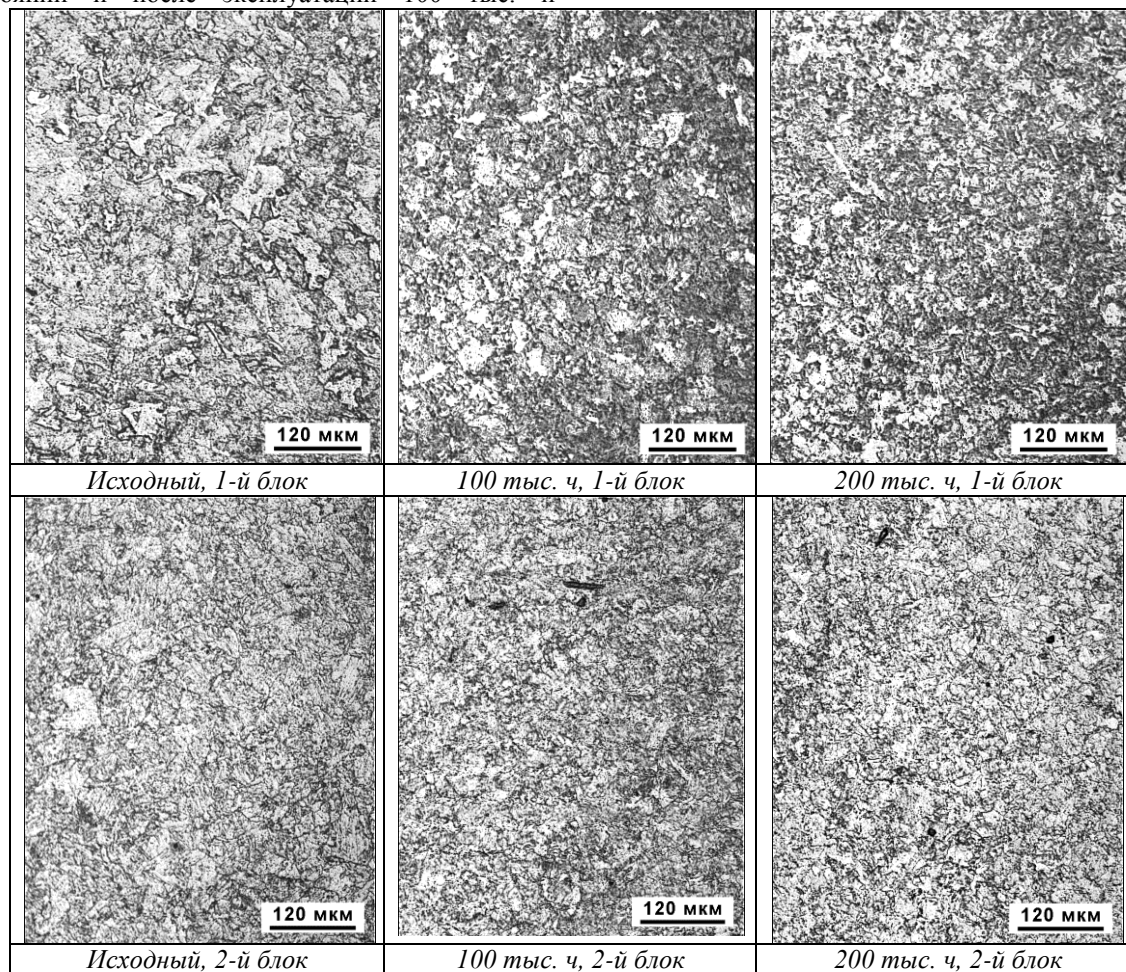


Рис. 1. Микроструктура стали 10ГН2МФА в ГЦТ на первом и втором блоках ЮУ АЭС до и после эксплуатации 100 тыс. и 200 тыс. ч

Таблица 1

Размер зерна и микротвердость металла ГЦТ до и после эксплуатации

Энергоблок	Исходные		После 100 тыс. ч		После 200 тыс. ч	
	$d_{ср}$, мкм	$H_{ц}$, кг/мм ²	$d_{ср}$, мкм	$H_{ц}$, кг/мм ²	$d_{ср}$, мкм	$H_{ц}$, кг/мм ²
1-ГЦТ	80	210	55	196	55	213
2-ГЦТ	29	240	22	238	22	218

Микротвердость металла в исходном состоянии на ГЦТ обоих блоков также заметно различается: в случае 2-ГЦТ металл более твердый (средние значения $H_{ср} = 240$ кг/мм²), чем в случае 1-ГЦТ ($H_{ср} = 210$ кг/мм²). Возможно, это является следствием более крупного зерна в первом случае. Наблюдается незначительное снижение микротвердости со временем эксплуатации. Это особенно заметно для 2-ГЦТ (см. табл. 1) и объясняется, по-видимому,

увеличением доли пластинчатого перлита, имеющего твердость ниже, чем зернистый перлит. Имеется некоторое различие химических составов металла ГЦТ (табл. 2), которое лежит в пределах требований технических условий.

По большей части включения представляют собой сульфиды марганца. Наличие их в технических сталях общеизвестно.

Таблица 2

Химический состав стали 10ГН2МФА

Элемент, %	C	Si	Mn	Ni	Mo	V	S	P	Cr	Cu
По ТУ 975Е 004511. Ред. 5	0,08	0,17	0,70	1,70	0,40	–	–	–	–	–
Фактический 1-ГЦТ	0,12	0,37	0,90	2,00	0,60	0,04	0,020	0,020	0,30	0,30
Фактический 2-ГЦТ	0,09	0,31	0,79	1,89	0,52	0,03	0,013	0,011	0,17	0,04
Фактический 2-ГЦТ	0,11	0,26	0,77	1,85	0,58	–	0,07	0,01	0,14	0,03

Локальный микрорентгеноспектральный анализ в отдельных местах структуры подтвердил, что состав металла обоих ГЦТ после эксплуатации соответствует марке стали 10ГН2МФА.

Исследования металла методами электронной микроскопии выявили и подтвердили те же особенности в структуре металла, что и ранее [1]: наличие неметаллических включений в виде глобулярных частиц размерами 5...10 мкм и карбидных выделений по границам зерен. Глобулярные включения в металле обнаружены после испытаний образцов на ударный изгиб. Включения хорошо видны на некоторых

фрактограммах образцов в растровом электронном микроскопе (РЭМ). На фрактограмме (рис. 2) показана группа типичных включений на фоне вязкого разрушения металла. В ямках излома наблюдается отслоение включений от основного металла, что было замечено также и при исследованиях металла 1-ГЦТ. Элементный состав, установленный с помощью микрорентгеноспектрального анализа для основного количества наблюдаемых включений, а также для встречающихся иногда включений, содержащих алюминий, приведен ниже (см. рис. 2).

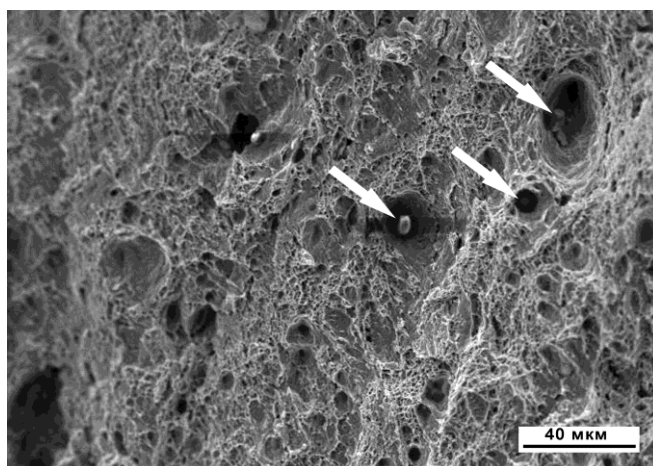


Рис. 2. Включения на вязком изломе образца стали 10ГН2МФА (показаны стрелками).
Элементный состав включений, вес. %: 5...8 O; 33...37 S; 51...54 Mn; 5...9 Fe; 4...5 Al

Отдельно глобулярное включение в структуре металла показано на рис. 3, который был получен с помощью РЭМ. Там же приведен состав включения. Элементный состав включений, определенный с помощью микроанализа на РЭМ, отличается повышенным содержанием углерода, что связано с осаждением углеродной пленки на поверхности анализируемого образца при проведении анализа.

Присутствие в некоторых включениях алюминия обусловлено, по-видимому, введением его в составе раскислителей при плавке стали. Диапазоны химических составов включений одинаковы для металлов 1-ГЦТ и 2-ГЦТ.

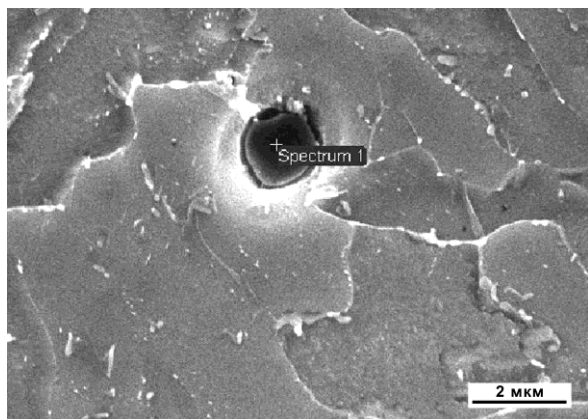


Рис. 3. Включение в стали 10ГН2МФА. Элементный состав включения, вес. %: 1,10 C; 8,1 S; 11,44 Mn; 78,12 Fe; 1,23 Ni

Электронно-микроскопические исследования подтвердили увеличение количества пластинчатого перлита в структуре металла со временем эксплуатации ГЦТ. Следует отметить, что структура образцов относительно содержания пластинчатого перлита довольно неоднородна. На рис. 4 показан участок структуры стали 10ГН2МФА после 100 тыс. ч эксплуатации с большим содержанием пластинчатого перлита, который в виде параллельных пластинок просматривается вместе с участками зернистого перлита.

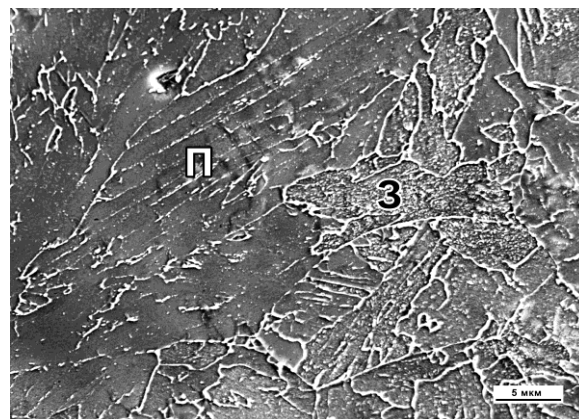


Рис. 4. Пластинчатый и зернистый перлит (П и З) в стали 10ГН2МФА после 100 тыс. ч эксплуатации

При исследованиях металла 1-ГЦТ выделения карбидов по границам зерен были связаны с процессами старения. В металле 2-ГЦТ также наблюдается этот эффект с некоторыми различиями.

На рис. 5 показаны типичные участки с выделениями карбидов в структуре после эксплуатации 2-ГЦТ 100 тыс. и 200 тыс. ч.

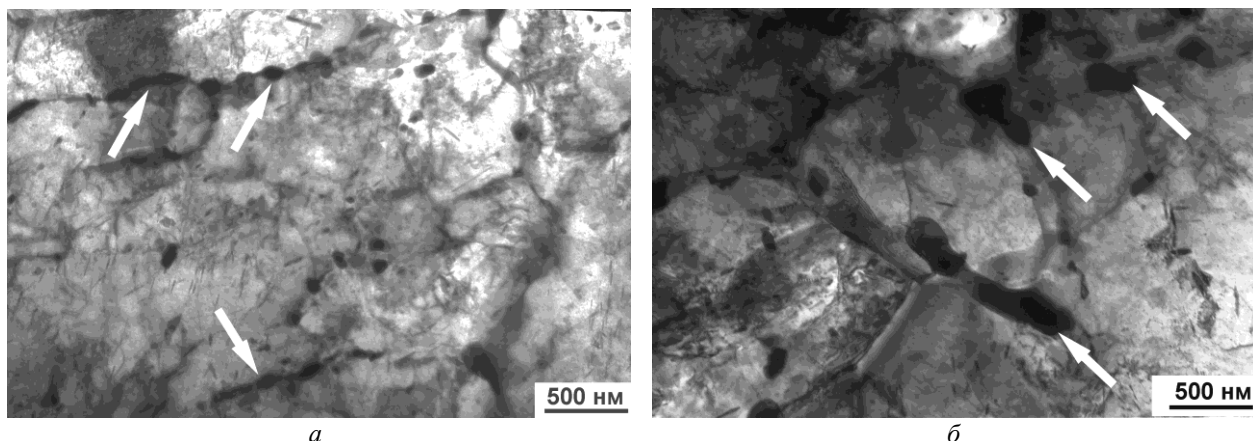


Рис. 5. Выделения карбидов на границах структуры в стали 10ГН2МФА после эксплуатации 2-ГЦТ: а – 100 тыс. ч; б – 200 тыс. ч (показаны стрелками)

На рисунках видно, что выделения после 200 тыс. ч эксплуатации (см. рис. 5,б) заметно крупнее, чем после 100 тыс. ч, причем наблюдается в некоторых случаях слияние выделений. Также заметно отличается распределение выделений на

исследуемой поверхности металла. В табл. 3 приведено сопоставление средних размеров выделений $D_{ср}$ и количества их на единицу объема $N/м^3$ для образцов металла 1-ГЦТ и 2-ГЦТ после 100 тыс. и 200 тыс. ч эксплуатации.

Таблица 3

Средние размеры выделений и их распределение в металле 1-ГЦТ и 2-ГЦТ

Энергоблок	$D_{ср}$, нм (100 тыс. ч)	$D_{ср}$, нм (200 тыс. ч)	$N/м^3$ (100 тыс. ч)	$N/м^3$ (200 тыс. ч)
1-ГЦТ	83	74	$23 \cdot 10^{18}$	$26 \cdot 10^{18}$
2-ГЦТ	97	142	$45 \cdot 10^{18}$	$36 \cdot 10^{18}$

Как видно из таблицы, размеры выделений, а также распределение их по структуре металла в рассматриваемых случаях несколько отличаются.

В табл. 4 приведены результаты испытаний образцов из 1-ГЦТ и 2-ГЦТ на ударный изгиб при температуре 20 °С.

Таблица 4

Ударная вязкость ($T_{исп} = 20$ °С) основного металла колена ГЦТ после 100 тыс. и 200 тыс. ч эксплуатации

Энергоблок	Ударная вязкость KCV, (кгс·м)/см ²			
	ТУ 975 Е004511. Ред. 5	Паспорт на ГЦТ	100 тыс. ч эксплуатации	200 тыс. ч эксплуатации
1-ГЦТ	≥ 4,8	21,0	21,6	20,8
2-ГЦТ		28,8	24,2	23,1

Из таблицы видно, что работа разрушения образцов металла 1-ГЦТ и 2-ГЦТ с большим запасом соответствует требованиям нормативной документации, при этом для 2-ГЦТ наблюдается некоторое снижение данных KCV со временем эксплуатации от значений паспортных данных для исходного металла. Результаты механических испытаний образцов металла 1-ГЦТ и 2-ГЦТ на растяжение приведены в табл. 5.

Из таблицы видно, что механические свойства металла 1-ГЦТ и 2-ГЦТ после эксплуатации 100 тыс. и 200 тыс. ч изменились незначительно. Наибольшие изменения по сравнению с паспортными данными претерпели за 100 тыс. ч эксплуатации пределы текучести $\sigma_{0,2}$ при 20 °С (≈ 15 % для 1-ГЦТ и ≈ 10 % для 2-ГЦТ). Наименьшие различия между паспортными и экспериментально полученными данными наблюдаются при температуре испытаний 350 °С.

Механические свойства образцов металла 1-ГЦТ и 2-ГЦТ

По паспорту								
Энергоблок	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²		σ_b , кгс/мм ²		δ , %		ψ , %	
	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$
1-ГЦТ	42,7	32,5	58,5	53,3	29,4	25,3	75,6	71,8
2-ГЦТ	44,8	39,1	58,1	53,1	26,7	21,8	75,6	68,7
100 тыс. ч эксплуатации								
	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²		σ_b , кгс/мм ²		δ , %		ψ , %	
	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$
1-ГЦТ	47,1	41,2	61,9	56,7	27,3	22,5	74,7	72,0
2-ГЦТ	50,0	40,0	60,8	53,0	25,8	21,0	74,0	69,0
200 тыс. ч эксплуатации								
	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²		σ_b , кгс/мм ²		δ , %		ψ , %	
	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$
1-ГЦТ	49,3	40,9	63,0	56,0	26,3	21,5	71,3	69,0
2-ГЦТ	47,7	38,5	59,4	52,7	27,0	22,0	77,0	72,3

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление результатов исследований стали 10ГН2МФА главных циркуляционных трубопроводов после длительной эксплуатации на первом и втором энергоблоках ЮУ АЭС в значительной мере дали ответ на основной вопрос настоящей работы. Это то, что изменения микро-структуры стали и ее механических свойств за 200 тыс. ч эксплуатации не вышли за пределы требований технических условий, и это дало основание на безопасное продление эксплуатации ГЦТ.

Характер перлитной структуры и величина зерна стали 1-ГЦТ и 2-ГЦТ соответствуют требованиям нормативной документации. Вместе с этим имеются существенные различия в микроструктуре сталей ГЦТ, которые согласно выводам работы [9] могут оказывать влияние на процессы старения. Отмеченное различие средней величины зерна в металле (в пределах требований ТУ) можно объяснить, по-видимому, некоторыми различиями технологических режимов изготовления гибов ГЦТ. Гибы для труб большого диаметра изготавливают на трубогибочных станках с нагревом до температуры аустенизации с последующим отжигом на микроструктуру. Величина образующегося при этом зерна зависит от скорости охлаждения, которая может различаться на разных станках. Гибы для ГЦТ первого блока (запуск первого энергоблока ЮУ АЭС в 1982 г.) изготавливались компанией Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd (Япония), тогда как для второго блока (запуск второго энергоблока ЮУ АЭС в 1983 г.) – на «Ижорском заводе» (Россия). При этом могли отличаться именно скорости охлаждения. То, что стали одной марки для труб, изготовленных на разных заводах–поставщиках, могут отличаться друг от друга даже в исходном состоянии и тем более после длительной эксплуатации – известный факт [10]. Хотя для ГЦТ микроструктура металла соответствует нормативным требованиям, различная величина зерна может оказывать существенное влияние на процессы старения и ресурс. Ранее были описаны теоретические предпосылки того, как влияют на процесс старения различные факторы, в

том числе размер зерна [10]. В настоящей работе представилась возможность оценить влияние величины зерна стали 10ГН2МФА на ресурс эксплуатации ГЦТ.

Уменьшение средних размеров зерен со временем эксплуатации, замеченное на 1-ГЦТ, подтвердилось и на 2-ГЦТ. Подтвердилось также снижение ударной вязкости стали. Оба эти признака могут указывать на стадии старения. После 200 тыс. ч эксплуатации в обоих ГЦТ произошли структурные изменения, при этом механические свойства металла остались в пределах нормативных требований.

Эксплуатация на протяжении 100 тыс. и 200 тыс. ч при исследованных температурах также указывает на прохождение процесса старения. Согласно [9, 10] именно предел текучести является наиболее чувствительным фактором при старении. Предел текучести относится к характеристикам прочности, и на него в значительной мере влияет микроструктура.

Выделения карбидов на границах зерен, отмеченные в результатах электронно-микроскопических исследований, отвечают механизму старения, рассмотренному в работах [9, 10]. Согласно этому механизму пограничные карбиды образуются в результате перехода углерода из пересыщенного твердого раствора в феррите на границы зерен, в результате чего идет образование новых субграниц. Происходит преобразование зернистого перлита в пластинчатый, уменьшается средний размер зерен. Эти процессы хорошо иллюстрирует рис. 4. На приведенном рис. 5 показан характер выделений карбидов в стали 10ГН2МФА для металла 2-ГЦТ. Полученные на основании статистических измерений средние диаметры выделений для 2-ГЦТ крупнее, чем для 1-ГЦТ (см. табл. 3). Наблюдается слияние нескольких выделений (см. рис. 5,б). Более крупные выделения, а также более частое их расположение объясняется различием величины зерна в металле ГЦТ. В [9, 10] показано, что в сталях одного класса, с одинаковым пересыщением феррита углеродом, чем мельче зерно, тем быстрее идет процесс старения. Объясняется это разными расстояниями, которые должны пройти атомы углерода,

диффундируя в объеме зерна. Это заключение, сделанное автором [10], объясняет, почему иногда трубные стали с мелкозернистой структурой оказываются подверженными старению быстрее, чем такие же стали с более крупным зерном. В случае материалов 1-ГЦТ и 2-ГЦТ реализуется именно такая ситуация. Согласно экспериментальным данным имеются все признаки более быстрого старения стали в энергоблоке 2-ГЦТ по сравнению с 1-ГЦТ. Возможно, это вызвано мелкой структурой. Этому способствовать может также большее пересыщение углеродом стали 2-ГЦТ. Предположить это позволяют результаты химических анализов исходных сталей, согласно которым содержание углерода у металла 2-ГЦТ несколько выше (в пределах требований ТУ).

Более определенный ответ по старению сталей в ГЦТ дают результаты испытаний образцов на ударный изгиб (см. табл. 4). Со временем эксплуатации KCV для 2-ГЦТ падает быстрее, чем для 1-ГЦТ. Из этого следует однозначно, что старение в энергоблоке 2-ГЦТ развивается интенсивнее, чем в более крупнозернистой стали 1-ГЦТ. Первопричиной ускоренного старения стали 2-ГЦТ, конечно, может быть более высокая температура эксплуатации. Авторы [8] рассчитали, что для труб магистральных газопроводов повышение температуры эксплуатации с 20 до 40 °С приводит к уменьшению характерного времени старения в 10 раз из-за экспоненциальной зависимости от температуры эффективного коэффициента диффузии углерода в феррите.

Проведенные исследования показывают, что микроструктура стали 10ГН2МФА с пограничными карбидными выделениями может служить признаком старения металла. С этой точки зрения, а также учитывая результаты механических испытаний и ударной вязкости, можно утверждать, что 1-ГЦТ и 2-ГЦТ после 200 тыс. ч эксплуатации обладают значительным остаточным ресурсом.

Отмеченные в ходе исследований включения, содержащие марганец и алюминий, являются термодинамически стабильными, и в процессе эксплуатации в них не замечено каких-либо изменений, способных повлиять на свойства металла и ресурс ГЦТ.

Можно также констатировать, что маломасштабные вырезки, выполненные с поверхности труб, достаточно информативны для определения степени старения металла путем исследования структуры и свойств на микрообразцах, особенно в случаях, где производство полномасштабных вырезок невозможно. Очень важным, по нашему мнению, было бы получение новых данных по микроструктуре металла при разном времени эксплуатации ГЦТ. В этом случае можно будет создать эталоны микроструктур на всех стадиях старения металла с целью использования их при неразрушающем контроле ГЦТ на других энергоблоках с ВВЭР-1000. Такие данные будут полезны для прогнозирования срока службы ГЦТ.

Таким образом, результаты проведенных исследований и испытаний показали, что сталь 10ГН2МФА в энергоблоках 1-ГЦТ и 2-ГЦТ обладает после 200 тыс. ч эксплуатации большим остаточным ресурсом. Однако это не освобождает от необходимости периодического контроля свойств металла с учетом важности вопросов безопасности контролируемых объектов.

ВЫВОДЫ

1. В процессе длительной эксплуатации ГЦТ на энергоблоках ВВЭР-1000 наблюдается эволюция микроструктуры и свойств стали 10ГН2МФА, заключающаяся в уменьшении средней величины зерна, увеличении доли пластинчатого перлита в структуре, появлении выделений зернограничных карбидов, снижении ударной вязкости.

2. За период 200 тыс. ч эксплуатации стали 1-ГЦТ и 2-ГЦТ не утратили своих свойств, обеспечивающих требования технических условий. Признаки старения проявились в 2-ГЦТ более заметно, чем в 1-ГЦТ. Наиболее вероятная причина этого, по нашему мнению, – более высокая температура эксплуатации. Способствовать ускоренному старению могут также мелкое зерно и повышенное пересыщение углеродом. Ответы на эти вопросы могут дать результаты контроля металла на других энергоблоках.

3. Результаты исследований подтвердили решение на продление эксплуатации главных циркуляционных трубопроводов на первом и втором энергоблоках ЮУ АЭС после 200 тыс. ч, а также показали перспективность применения для контроля металла метода среза маломасштабных темплетов с поверхности ГЦТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Н. Воеводин, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, С.В. Гоженко, Е.А. Крайнюк, Р.Л. Василенко, Н.Д. Рыбальченко. Эволюция микроструктуры металла главного циркуляционного трубопровода реактора ВВЭР-1000 в процессе его длительной эксплуатации // *Вопросы материаловедения*. 2017, №4(92), с. 183-192.

2. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, В.М. Пышный, А.С. Митрофанов 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»*. 2000, №4(78), с. 63-75.

3. И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, С.В. Гоженко, В.И. Савченко, В.В. Брык, Н.Д. Рыбальченко, Е.А. Крайнюк, А.В. Бажуков, П.Е. Мельник, В.В. Алексейчук. Результаты исследований механических свойств металла трубопровода энергоблока №2 Южно-Украинской АЭС после 100 тыс. часов эксплуатации // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика*

радиационных повреждений и радиационное материаловедение». 2004, №3(85), с. 52-58.

4. И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, С.В. Гоженко, А.С. Митрофанов, П.А. Мищенко. Оборудование и опыт применения методики определения механических свойств металла с помощью микрообразцов при контроле ГЦТ энергоблоков АЭС Украины после длительной эксплуатации // *Сб. трудов СИАЭП*. 2004, №12, с. 108-112.

5. ГОСТ 1778-70. Введ. 1970-12-29. *Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений*. М.: «Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР», 1970, 33 с.

6. ГОСТ 8233-56. Введ. 1957-07-01. *Сталь. Эталоны микроструктуры*. М.: «Комитет

стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР», 1970, 27 с.

7. Технические условия (Ред. 5): ТУ 975Е 004511. Введ. *Трубы бесшовные плакированные*. 1976, 27 с.

8. ГОСТ 5639-82. Введ. 1983-01-01. *Стали и сплавы*. М.: «ИПК Издательство стандартов», 1983, 21 с.

9. А.В. Нохрин, В.Н. Чувильдеев. Старение сталей труб магистральных газопроводов // *Вестник Нижегородского университета*. 2010, №5(2), с. 171-180.

10. Ю.А. Скаков. Старение металлических сплавов // *Металловедение. Металлургия*. 1971, с. 118-132.

Статья поступила в редакцию 31.05.2018 г.

ЕВОЛЮЦІЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ГЦТ «ГАРЯЧОЇ» І «ХОЛОДНОЇ» НИТОК ЕНЕРГОБЛОКІВ ПІВДЕННО-УКРАЇНСЬКОЇ АЕС У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОТЯГОМ 200 ТИСЯЧ ГОДИН

В.М. Воєводін, А.С. Митрофанов, С.В. Гоженко, Є.О. Крайнюк, Р.Л. Василенко, А.В. Бажуков, А.М. Палій, П.Є. Мельник

Досліджено мікроструктуру і механічні властивості сталі 10ГН2МФА головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ) АЕС з ВВЕР-1000 після 200 тис. годин експлуатації. Були застосовані металографічні методи, електронна мікроскопія, проведені механічні статичні і ударні випробування. Отримані результати зіставлені з результатами за зразками металу ГЦТ після 100 тис. годин експлуатації. Виявлено ознаки старіння металу, ймовірною причиною якого можуть служити експлуатаційні фактори та процеси, що протікають на мікроструктурному рівні. На прикладі ГЦТ показано, що маломасштабні вирізки металу досить інформативні в плані контролю структури і механічних властивостей металу обладнання та трубопроводів АЕС.

MICROSTRUCTURE OF THE METAL MCP AT THE 2ND POWER UNIT OF THE SOUTH NPP AFTER 200 THOUSAND HOURS OF OPERATION

V.N. Voyevodin, A.S. Mitrofanov, S.V. Gozhenko, Y.A. Krainyuk, R.L. Vasilenko, A.V. Bazhukov, A.N. Paliy, P.Y. Melnik

The microstructure and mechanical properties of 10MnNi2MoV (high-quality) steel of the main circulation pipeline (MCP) of the WWER-1000 NPP after 200 thousand hours of operation were investigated. Metallographic methods, scanning electron microscopy, mechanical static and impact tests were used. The obtained results are compared with the results of the samples of the metal of the MCP after 100 thousand hours of operation NPP. The signs of aging of the metal are revealed, the probable cause of which can serve as operational factors and processes occurring at the microstructural level. The example of the MCP shows that small-scale metal cuttings are sufficiently informative to control the structure and mechanical properties of metal equipment and pipelines of nuclear power plants.