

## **Влияние дефектов на характеристики прочности теплообменных труб парогенераторов ПГВ-1000**

**И. М. Неклюдов, А. С. Митрофанов, Л. С. Ожигов, Е. А. Крайнюк,  
В. И. Савченко, Ж. С. Ажажа**

Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Харьков, Украина

*Проведено сравнение данных испытания кольцевых образцов из теплообменных труб без дефектов и с различного вида дефектами. Проанализированы зависимости характеристик прочности образцов от характера и глубины дефектов.*

**Ключевые слова:** теплообменная труба, эксплуатационные дефекты, механические свойства, коррозионные повреждения.

**Введение.** Назначенный проектом ресурс парогенераторов ПГВ-1000, как и другого основного оборудования АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000, составляет 30 лет. Однако на ряде станций парогенераторы выведены из эксплуатации задолго до исчерпания назначенного ресурса, в частности, из-за сверхнормативного количества заглушенных труб теплообменника. Глушение труб производится в большинстве случаев из-за образования в них коррозионных дефектов, что приводит к разгерметизации первого контура. Трубы наружным диаметром 16 мм и толщиной стенки 1,5 мм изготавливаются из аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T и эксплуатируются при температуре около 300°С и перепаде давления примерно 8 МПа (существует также наиболее жесткий режим гидроиспытаний на прочность с давлением 25/11 МПа).

Как показано во многих исследованиях, эксплуатационные дефекты возникают на наружной поверхности труб (со стороны второго контура) в результате коррозии под напряжением. По нашим данным, полученным на большом количестве образцов, дефекты можно представить как коррозионные язвы, трещины и пятна коррозии [1, 2]. Анализ, предшествующий глушению каждой дефектной трубы, должен прогнозировать возможность развития дефекта в процессе эксплуатации. Методы контроля позволяют определять глубину дефектов, однако остается неизвестной степень повреждения металла вокруг коррозионных поражений. При этом часто возникают опасения, что в области дефектов возможны скалывание или раскрытие участков трубы. Однозначно ответить на эти вопросы в настоящее время не представляется возможным, поскольку отсутствуют данные о том, как наличие коррозионных дефектов в элементе конструкции отражается на его прочностных свойствах.

Цель проведенных испытаний заключается в установлении влияния различных коррозионных дефектов на характеристики прочности теплообменных труб.

**Методика проведения испытаний.** Для экспериментального определения влияния дефектов использовали метод испытания кольцевых образцов [3]. Суть метода состоит в проведении статических испытаний таких образцов на

растяжение в окружном направлении. Образцы представляли собой кольца, внешний диаметр которых составляет 16 мм, толщина – 1,5 мм и ширина – 3 мм. Образцы изготавливали из фрагментов теплообменных труб, вырезанных из парогенератора, после очистки от эксплуатационных отложений [4].

Испытывали несколько видов образцов:

- с эксплуатационными дефектами разных типов и размеров;
- с искусственными V-образными надрезами разной глубины (контрольные) – рис. 1.

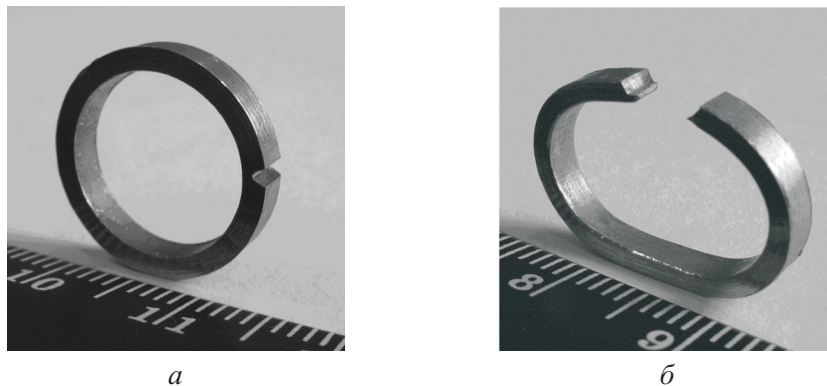


Рис. 1. Кольцевой образец с V-образным надрезом до (а) и после (б) испытаний на растяжение.

Влияние коррозионных дефектов определяли путем сопоставления результатов испытаний образцов с эксплуатационными дефектами и контрольных. На образцах без надрезов определяли механические свойства с целью сравнения их с приведенными в литературных источниках. Напряжение, требующееся для раскрытия колец, определяли на образцах со сквозными надрезами.

Испытания осуществляли путем растяжения кольцевых образцов до момента разрыва с помощью двух полудисков, расположенных внутри образцов (рис. 2).

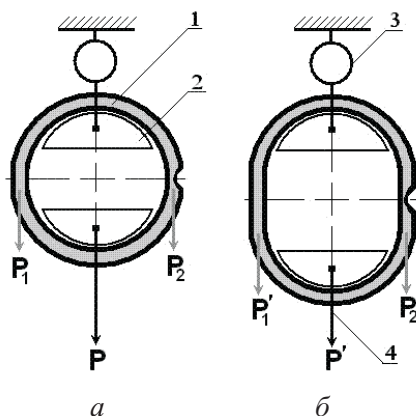


Рис. 2. Схемы механических испытаний кольцевых образцов до их начала (а) и в процессе (б): 1 – образец; 2 – полудиски; 3 – тензодатчик; 4 – направление приложения нагрузки;  $P$  и  $P'$  – нагрузки до и в процессе испытаний;  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P'_1$ ,  $P'_2$  – распределение нагрузки по сторонам кольца до и в процессе испытаний соответственно.

В процессе испытаний сначала происходит формоизменение кольца, оно приобретает эллиптическую форму и постепенно выравнивается, в том числе в дефектной зоне. Разрыв образца происходит на стадии, когда участок с дефектом становится практически прямолинейным.

Испытания проводили на разрывной машине 1246P-2/2300 при температуре 20 и 300°С в вакууме. Скорость растяжения составляет 1 мм/мин. В результате испытаний в окружном направлении определяли предел прочности  $\sigma_B$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и относительное удлинение  $\delta$ .

На рис. 2 приведена схема распределения нагрузок при испытаниях колец на разрыв.

Нагрузки распределяются на обеих сторонах кольца равномерно, т.е.  $P_1 = P_2 = P/2$ . Дефекты (и надрезы) при установке образцов находятся с одной стороны кольца между полудисками. Надрезы делаются глубиной 0,25–1,08 мм, что составляет 17...72% толщины стенки кольца.

При этом принимается во внимание, что для практики вихретокового контроля труб представляют интерес дефекты в области 20...70%. Дефекты глубиной менее 20% не рассматриваются нормами контроля как таковые, а выше 70% приводят к необходимости глушения труб из-за их недостаточной надежности.

По диаграммам растяжения кольцевых образцов с искусственными надрезами и эксплуатационными дефектами различных видов находили условный предел текучести и предел прочности в окружном направлении. После разрыва колец определяли сечение дефектов. Для этого методом металлографии получали фотоснимок поверхности разрушения после разрыва колец, по которому с помощью компьютерной программы вычисляли площадь дефектов. Пример поверхности разрушения кольца с язвой, захватывающей всю ширину кольца, приведен на рис. 3,а. На рис. 3,б на том же снимке показаны выделенные площади дефектного и “живого” металла.

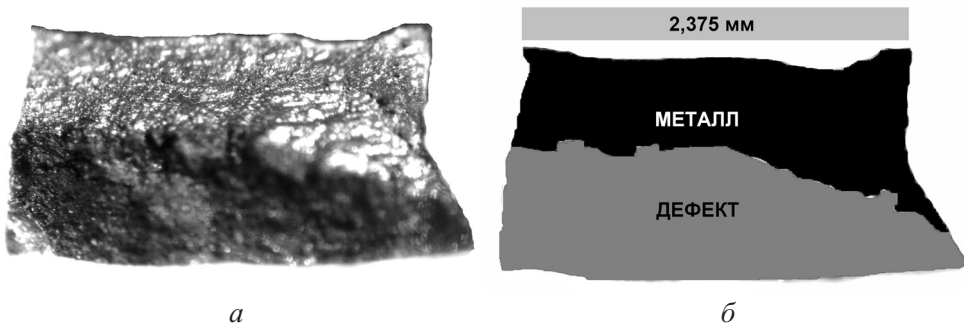


Рис. 3. Поверхность разрушения на кольце с коррозионной язвой (дефект – темная область) – а и поверхность разрыва с выделенными площадями дефектного и “живого” металла – б.

При анализе предполагалось, что геометрические размеры дефектов не изменяются при растяжении колец. Исходную площадь металла в месте разрыва  $S_M$  определяли как разность между исходной площадью образца в месте дефекта  $S_2$  и найденной площадью дефекта после разрушения  $S_D$ :

$$S_M = S_2 - S_D.$$

**Результаты и их обсуждение.** В табл. 1 и 2 приведены результаты испытаний контрольных кольцевых образцов без надрезов и с надрезами различной глубины при температуре 20 и 300°C, усредненные по данным трех образцов. Напряжения, которые требуются для раскрытия колец и определяются на образцах со сквозными прорезями при  $T = 300^\circ\text{C}$ , составили 110 МПа.

Т а б л и ц а 1

Результаты испытаний контрольных образцов при  $T = 20^\circ\text{C}$

Глубина надреза, %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
Без надреза	441	644	47,8
23	431	578	12,6
43	480	568	2,6
55	431	490	0,8
70	–	323	0,6

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний контрольных образцов при  $T = 300^\circ\text{C}$

Глубина надреза, %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
Без надреза	362	448	11,6
26	411	460	3,6
42	333	402	1,2
56	–	392	–
72	–	245	–

По результатам испытаний наблюдается тенденция к снижению относительных значений пределов прочности с глубиной надрезов. При этом предел текучести на диаграммах растяжения для образцов с надрезами глубиной 56% и более не определяется.

В табл. 3 приведены результаты испытаний кольцевых образцов с эксплуатационными дефектами при температуре 300°C, приближенной к условиям эксплуатации теплообменных труб. Диаграммы растяжения кольцевых образцов с надрезами и дефектами различных видов показывают, что во всех случаях напряжения, при которых начинаются необратимые формоизменения колец, одинаковы ( $130 \pm 20$  МПа).

На рис. 4, 5 представлены полученные при испытаниях значения пределов текучести и прочности для образцов с исследованными видами коррозионных дефектов при различной глубине поражения. Там же с целью сопоставления приведены аналогичные значения для контрольных образцов с искусственными надрезами. Для всех типов образцов при глубине поражения более 50% наблюдается снижение пределов текучести.

Зависимости пределов прочности для образцов с различными типами дефектов с учетом разброса экспериментальных значений ( $\approx 5\%$ ) располагаются в полосе шириной около 100 МПа. Из рис. 5 видно, что при одинаковой

Т а б л и ц а 3

**Результаты испытаний кольцевых образцов с эксплуатационными дефектами  
при 300°С**

Тип дефекта	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Глубина дефекта $h$ , %
Коррозионные язвы	322	345	2,5	46,6
	311	369	4,0	23,0
	295	336	2,0	36,0
	346	371	3,0	30,0
	405	442	3,0	20,0
	371	420	2,5	42,0
	346	359	4,0	18,0
	258	273	2,0	43,0
	333	383	5,0	4,0
	370	451	8,0	6,2
	384	446	5,0	8,3
	366	428	5,0	12,5
	348	402	5,0	12,0
	364	425	11,0	5,0
	362	415	5,0	11,0
	375	440	6,0	16,4
	–	165	–	85,0
	–	157	–	93,0
Трещины	345	374	1,5	35,0
	362	406	1,5	40,0
	399	426	2,0	33,4
	391	414	1,5	50,5
	353	407	4,0	12,0
	397	431	3,5	24,0
	408	408	2,0	26,2
	394	394	1,0	44,7
	405	486	3,5	24,0
	–	164	–	84,0
	–	156	–	93,0
Коррозионные пятна	295	–	4,0	16,6
	410	520	6,3	4,0
	400	482	–	5,6
	430	514	3,0	17,0
	368	398	4,0	10,5
	317	383	–	24,5
	298	394	5,5	8,6

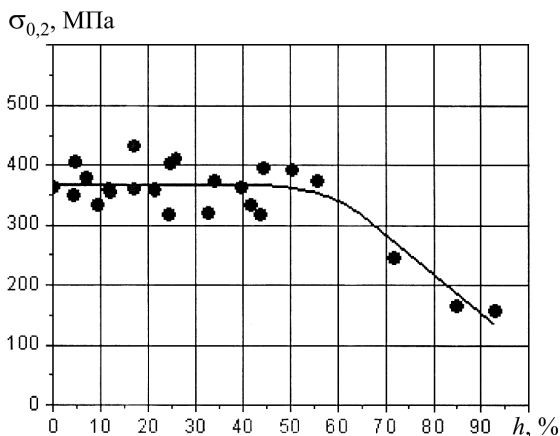


Рис. 4. Зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  от глубины дефектов  $h$  для кольцевых образцов с язвами, трещинами, коррозионными пятнами и надрезами при температуре  $300^\circ\text{C}$ .

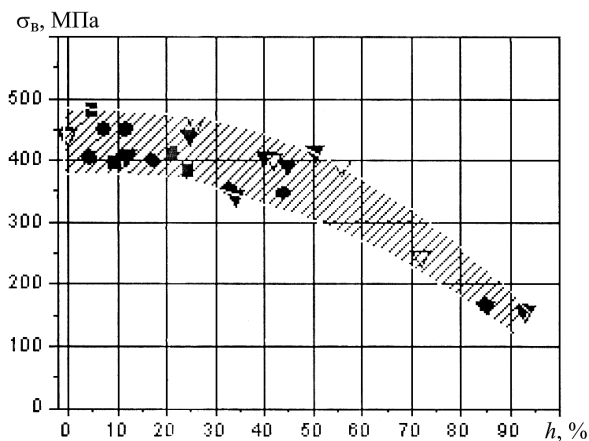


Рис. 5. Зависимость предела прочности  $\sigma_B$  от глубины дефектов  $h$  для кольцевых образцов с эксплуатационными дефектами и надрезами при температуре  $300^\circ\text{C}$ . (Здесь и на рис. 6: ● – язвы; ▼ – трещины; ■ – пятна коррозии; ▽ – надрезы.)

глубине поражения наблюдается аналогия между значениями пределов прочности для образцов с эксплуатационными дефектами и надрезами.

На рис. 6 показаны зависимости относительного удлинения  $\delta$  как функции глубины дефекта. Для кольцевых образцов всех видов значение  $\delta$  уменьшается по экспоненциальным зависимостям с 12% для бездефектных образцов ( $h = 0$ ) до 1% при  $h > 50\%$ . При одинаковой глубине дефектов минимальную пластичность имеют образцы с надрезами, наибольшее относительное удлинение – образцы с язвами.

При сопоставлении результатов испытаний кольцевых образцов с коррозионными дефектами и образцов с надрезами можно отметить, что полученные экспериментальные зависимости механических свойств от глубины дефектов для указанных образцов существенно не различаются или же различаются в пределах разброса экспериментальных данных. Таким образом, влияние коррозионных дефектов на прочностные характеристики можно считать сопоставимым с влиянием механических надрезов.

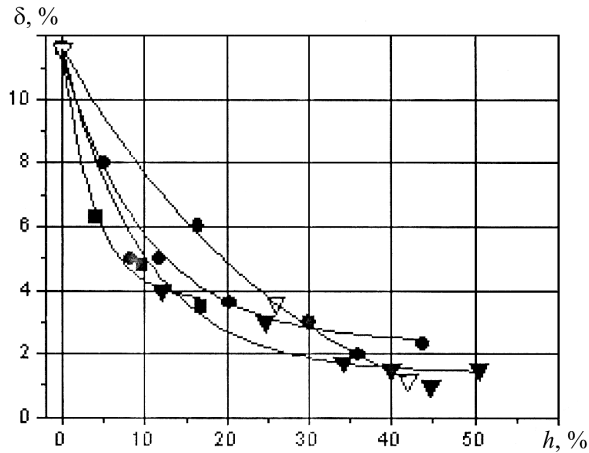


Рис. 6. Зависимость относительного удлинения  $\delta$  от глубины дефектов  $h$  для кольцевых образцов с эксплуатационными дефектами и надрезами при температуре  $300^{\circ}\text{C}$ .

## Выводы

1. Проведены испытания кольцевых образцов теплообменных труб из стали 08X18H10T с коррозионными дефектами после эксплуатации в парогенераторе ПГВ-1000 и искусственно нанесенными надрезами.

2. Получены данные о влиянии различного вида дефектов на характеристики прочности образцов.

## Резюме

Проведено зіставлення даних випробувань зразків із теплообмінних труб без дефектів і з різного виду дефектами. Проаналізовано залежності характеристик міцності зразків від характеру та глибини дефектів.

1. Неклюдов И. М., Ожигов Л. С., Митрофанов А. С., Гоженко С. В. Коррозионные повреждения теплообменных труб парогенераторов Южно-Украинской АЭС: Сб. науч. тр. СНИЯЭиП. – 2003. – Вып. 8. – С. 55 – 63.
2. Неклюдов И. М., Ожигов Л. С., Митрофанов А. С. и др. Коррозионные повреждения металла во втором контуре энергоблоков реакторов ВВЭР-1000 // Там же. – 2004. – Вып. 10. – С. 72 – 79.
3. ДСТУ 2528-94. Метод випробування розтягуванням кільцевих зразків в умовах нагрівання. – Чинний з 01.07.1995.
4. Неклюдов И. М., Ажажа В. М., Ожигов Л. С. та ін. Атлас експлуатаційних дефектів у теплообмінних трубах парогенераторів АЕС з реакторами типу ВВЭР // Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації споруд та машин”. – Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 157 – 161.

Поступила 13. 08. 2008