



## ТЕХНОЛОГИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПАРОПРОВОДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО УРОВНЮ МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА

Е. Я. ВЕКСЛЕР, И. В. ЗАМЕКУЛА, В. Ю. ТОЛСТОВ, Е. В. СЕМЕШКО

*Рассмотрена проблема прогнозирования остаточного ресурса паропроводов высокого давления тепловых электростанций с наработкой, превышающей нормативную. На базе анализа результатов исследования более 1500 труб действующих паропроводов показана закономерная связь эксплуатационных изменений структуры, субструктуры и свойств стали с уровнем накопленной микрповрежденности. Предложена технология прогнозирования остаточного ресурса металла паропроводов по результатам оценки микрповрежденности в сочетании со стандартными методами диагностирования.*

*The paper deals with the problem of prediction of the residual life of high-pressure steam pipelines of thermal power plants with the operating life longer than the specified life. Analysis of the results of investigation of more than 1500 pipes of operating steam pipelines was used as the basis to demonstrate the regular interdependence of operational changes of structure, substructure and properties of steel with the level of accumulated microdamage. Technology of forecasting the residual life of steam pipeline metal by the results of evaluation of microdamage in combination with standard diagnostic techniques is proposed.*

Основное генерирующее оборудование Киевской энергосистемы с номинальными рабочими параметрами пара, температурой 535...560 °С и давлением 9,0...25,5 МПа к настоящему времени отработало нормативные сроки, а в ряде случаев срок эксплуатации важнейших узлов блоков достиг или значительно превысил расчетный (проектный) или парковый ресурс.

В этой ситуации использование методов оценки остаточного ресурса и прогнозирование надежной эксплуатации оборудования становится насущной проблемой.

Одним из наиболее ответственных открытых узлов энергооборудования станции являются главные паропроводы, транспортирующие пар высоких и сверхвысоких параметров от котла к турбине. При этом наиболее опасными зонами потенциального техногенного риска на паропроводе являются гнутые трубы, которые по конструктивным особенностям и технологии изготовления, а также за счет компенсационных нагрузок работают в условиях дополнительных рабочих напряжений на утоненной растянутой части гйба. Диагностирование состояния гйбов паропроводов обеспечивает надежность эксплуатации узла в целом.

В соответствии с требованиями действующих нормативных актов [1, 2], принятая в энергетике система постоянного мониторинга (технического диагностирования) состояния металла оборудования высокого давления (далее в/д) в процессе длительной эксплуатации использует различные не-

разрушающие методы исследования: визуальный контроль, измерительный контроль с определением остаточной деформации, толщины стенки и овальности труб, дефектоскопия, измерение твердости и расчет механических свойств, металлографический анализ [3–6]. В результате накоплен банк экспериментальных данных по служебным свойствам теплоустойчивых паропроводных сталей 12Х1МФ, 15Х1М1Ф и закономерностям их изменений во времени.

Природу этих изменений исследовали на вырезках из паропроводов с применением новейших методов анализа микроструктуры и субмикроструктуры металла. Установлено, что в условиях длительной эксплуатации теплоустойчивых сталей при высоких температурах и напряжениях происходит деградация структуры металла, связанная с развитием процессов старения, распада основного твердого раствора и фазовыми превращениями обособившихся карбидов.

Развивающиеся во времени структурные изменения приводят к изменению кратковременных и длительных прочностных и пластических свойств стали.

В условиях длительной работы металла паропроводов в/д наиболее существенны процессы, связанные с образованием, движением и взаимодействием дислокаций и других несовершенств кристаллической решетки [7]. При этом происходит непрерывное накопление повреждаемости материала за счет последовательного образования вакансий и их скоплений, одиночных пор, цепочек



пор по границам зерен, их роста и слияния в микротрещины, развития макротрещин. С момента образования микротрещин в металле процесс накопления остаточной деформации ползучести идет с возрастающей скоростью и переходит в стадию разрушения.

Таким образом, объективным критерием надежности металла является его интегральная физическая поврежденность, накопленная в процессе длительной эксплуатации в условиях высоких температур и напряжений, которая может быть выражена по суммарному количеству микродефектов кристаллической решетки.

Задача прогнозирования сроков безаварийной работы паропроводов в/д может быть решена путем экспериментальной оценки фактической накопленной микроповрежденности и расчета остаточного ресурса металла, что позволит надежно эксплуатировать его до начала образования дефектов в виде трещин.

**Неразрушающие методы оценки микроповрежденности металла.** Поврежденность металла в процессе эксплуатации в условиях ползучести определяется с помощью оптического металлографического микроскопа по степени поражения структуры микропорами, образующимися по границам и на стыках границ зерен.

На рис. 1 представлены характерные микроструктуры металла паропроводных труб из стали

12Х1МФ, эксплуатирующихся в условиях ползучести (*a* — микроструктура трубы после срока службы, составляющего половину паркового ресурса, с единичными микропорами на границах и стыках зерен; *б* — микроструктура трубы, отработавшей парковый ресурс, с большим количеством пор в виде цепочек по границам зерен; *в*, *г* — структура поврежденной трубы с межкристаллитными макро- и микротрещинами, а также крупными порами на границах зерен).

На практике оценка состояния металла паропроводов, отработавших нормативные сроки, выполняется неразрушающими методами металлографического анализа. При этом проводится [2] контроль по месту не менее трех гнутых труб каждой марки стали и типоразмера паропровода, а в случае, когда выявляется неблагоприятная структура первых проверенных труб, объем контроля может быть увеличен вплоть до 100 %.

Для систематических массовых металлографических исследований труб по месту, без вырезки образцов и разрушения детали применяются портативные оптические микроскопы, обеспечивающие качественное изображение объекта.

Анализ микроструктуры проводится на шлифах, приготовленных непосредственно на поверхности исследуемой трубы в зоне растянутой частигиба с максимальным утонением стенки или на утоненном участке прямой трубы. Шлифовка

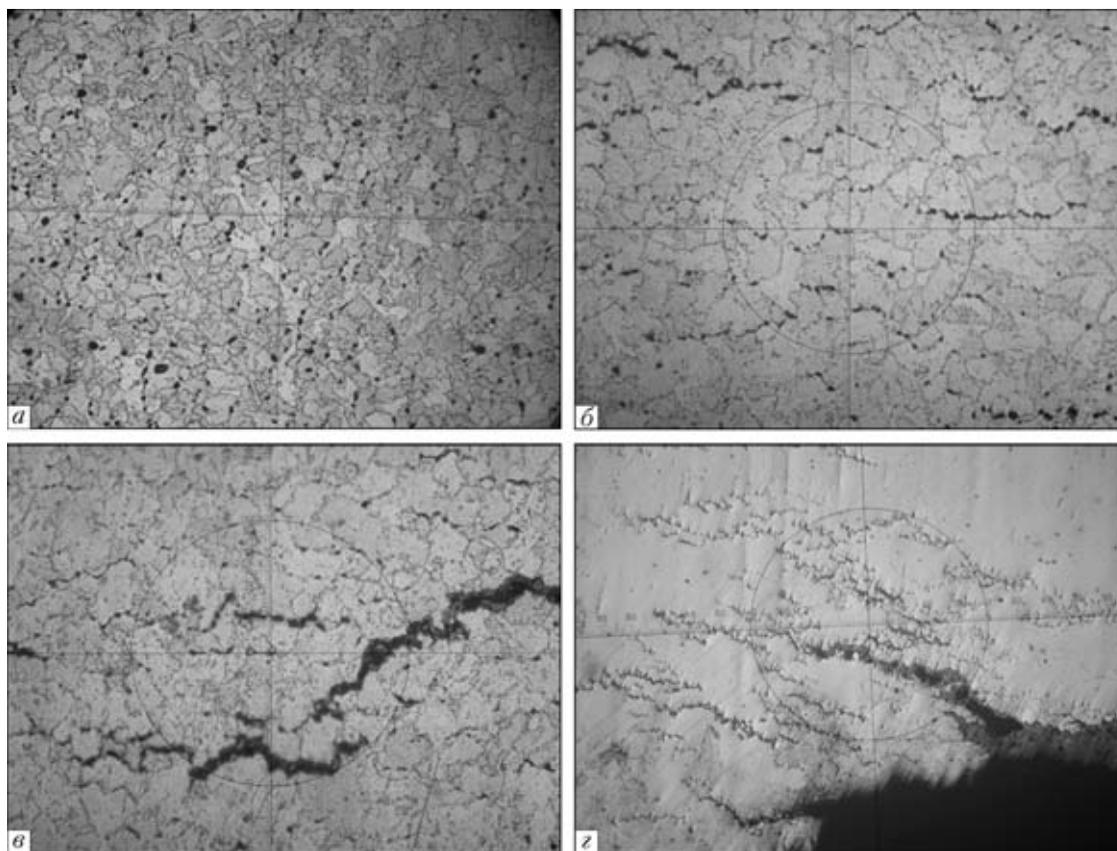


Рис. 1. Микроструктура металла паропроводных труб из стали 12Х1МФ с выявленными признаками микроповрежденности (*a* —  $\times 300$ ; *б*, *в* —  $\times 500$ ; *г* —  $\times 100$ )



поверхности выполняется алмазными эластичными дисками с различной величиной алмазного зерна, монтируемыми на электродрели. Для окончательной полировки шлифа используется окись хрома. Микроструктура металла выявляется методом химического травления стандартными травящими растворами [3, 6, 8].

Подготовленный микрошлиф изучается под микроскопом, после чего выполняется оттиск поверхности шлифа на пластиковых репликах. Готовые реплики исследуются на стационарном микроскопе в лабораторных условиях при увеличении 500 и 1000 раз.

На репликах-оттисках хорошо выявляются детали микроструктуры стали, микропоры размером 1...3 мкм на границах и стыках зерен, микротрещины различной протяженности. Качество микрофотографий структуры, снятых с реплик, практически не отличается от выполненных по стандартной методике на микрошлифах.

На рис. 2 показаны микроструктуры металла паропроводных труб, полученные на репликах с хорошо выявленными порами ползучести по границам зерен (рис. 2, а), цепочками пор по границам (рис. 2, б) и зародышевыми микротрещинами (рис. 2, в).

Неразрушающий контроль микроструктуры металла на репликах выполнялся при монтаже и в процессе длительной эксплуатации магистральных паропроводов из теплоустойчивых перлитных сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф.

Обнаружена значительная разнородность структурного состояния металла труб. Систематизация структур по форме и распределению фазовых составляющих стали позволила представить многообразие наблюдаемых структур в виде пяти наиболее характерных типов, расположенных по степени распространенности на трубах исследованных паропроводов.

Как следует из анализа статистического распределения труб по типу исходной микроструктуры металла, количество труб с оптимальной сварочной структурой баллов 1–5 стандартной шкалы [9] (бейнит, феррит и мелкие карбиды) составляло примерно 65 % исследованных. Значительное количество труб (~ 30 %) имело структуры отжига в межкритическом интервале температур, состоящие из полиэдров феррита, перлита и структурно свободных карбидов, что соответствует браковочным баллам 7...9 шкалы [9].

Особенно существенна структурная неоднородность, выявленная на гнутых участках паропроводов, где в большинстве случаев структуры металлагиба и прямого участка трубы неодинаковы, что связано с технологией деформирования и термообработки гнутых труб при изготовлении.

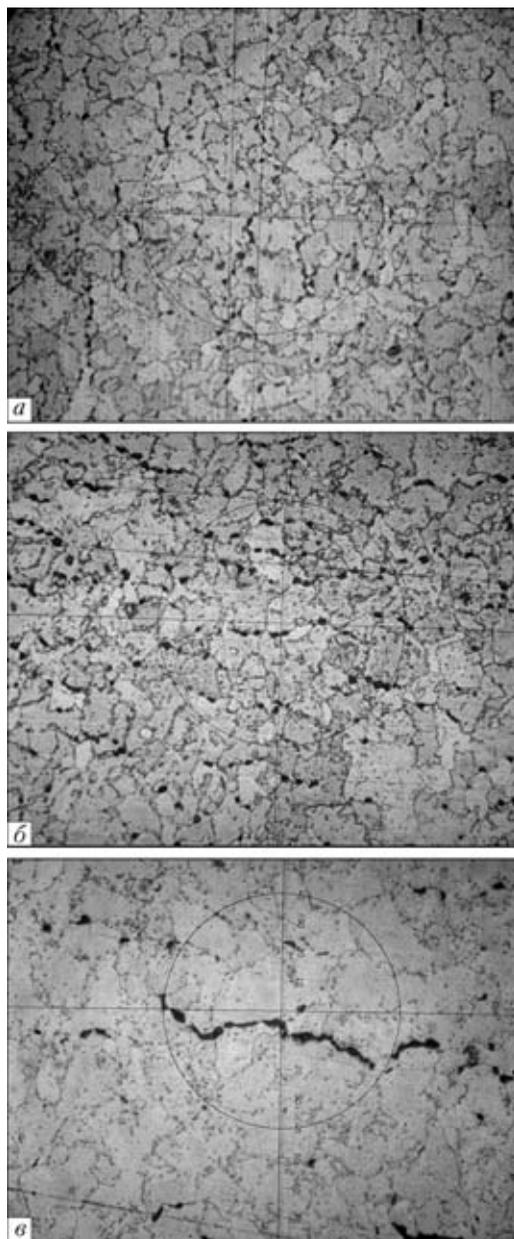


Рис. 2. Микроструктура металла паропроводных труб из стали 12Х1МФ, полученная на репликах (а, б —  $\times 500$ ; в —  $\times 1000$ )

Таким образом, исследованные действующие паропроводы, длительность эксплуатации которых в настоящее время превышает нормативную, смонтированы из труб, металл которых существенно различается по структуре и свойствам. Это обстоятельство, безусловно, сказывается на служебных свойствах конструкции и приводит к необходимости изучения поведения в процессе эксплуатации каждой трубы паропровода или группы труб с идентичной структурой.

С использованием неразрушающего метода металлографического анализа металла паропроводов в/д различных параметров пара, отработавших парковый ресурс, было проведено исследование микроструктуры и микрповрежденности более 1500 труб. Обобщенные данные микроструктур-



ного анализа металла гибов паропроводов, выполненного за период 2000–2008 гг., представлены в таблице.

По результатам анализа микроструктуры металла на репликах были выявлены единичные микропоры размером 1...2 мкм на стыках и границах зерен, цепочки пор размером 2...3 мкм по границам зерен и межкристаллитные микротрещины в материале, перешедшем в ускоренную стадию ползучести. Оценку степени поврежденности структуры проводили в соответствии с требованиями [2, 6] — выявленная микроповрежденность не должна превышать балла 4 по шкале [6], цепочки пор по границам зерен не допускаются [2].

Как видно из данных, приведенных в таблице, степень поврежденности металла гибов паропроводов остается допустимой (не более балла 4 [6]) в течение достаточно длительных сроков эксплуатации, составляющих при рабочей температуре 540 °С ~ 300 тыс. ч, при 545...550 °С ~ 250 тыс. ч и при 560 °С ~ 200 тыс. ч.

В основном поврежденность металла закономерно коррелирует с величиной остаточной деформации гибов, однако встречаются случаи, когда на гихах с повышенной деформацией были выявлены только единичные поры, что соответствует начальной стадии развития поврежденности (таблица, поз. 3, строки 8, 9, 12; поз. 4, строка 3).

Причина указанного несоответствия связана с локальным характером процесса накопления повреждаемости, а также, по-видимому, с особенностями конструкции и эксплуатационных факторов для конкретных деталей, что требует дополнительного исследования.

В то же время возможны случаи, когда при значительной степени поврежденности металла гига остаточная деформация трубы практически отсутствует (таблица, поз. 3, строки 7, 11). Подобные несоответствия закономерны и объясняются тем, что по принятой методике [2] деформация может быть измерена только на прямом участке гнутой трубы, в то время, как активное накопление микродефектов наблюдается на напряженных участках вершины гига. В такой ситуации приоритетом при оценке состояния металла гнутой трубы следует считать данные металлографического анализа.

По результатам диагностирования гнутые трубы с недопустимой остаточной деформацией и микроповрежденностью металла [2] были заменены, после чего паропроводы допущены к дальнейшей эксплуатации.

Длительный опыт применения технологии неразрушающего металлографического анализа на репликах показал практически неограниченные возможности метода для накопления данных по состоянию металла наиболее ответственных и, что

особенно важно, труднодоступных участков и узлов оборудования.

В то же время при оценке надежности дальнейшей эксплуатации металла, отработавшего нормативные сроки, с использованием данных неразрушающего контроля структуры, необходимо учитывать выборочность метода и то, что результаты анализа дают представление о микроповрежденности металла только на плоскости исследованного среза поверхности детали (шлифа). Кроме того, по данным анализа не может быть проведена количественная оценка остаточного ресурса, а практические рекомендации по результатам выполненного контроля носят качественный характер, что в производственных условиях не всегда является достаточным.

**Определение микроповрежденности и ресурса металла паропроводов по объемной плотности пор.** Наиболее информативным методом оценки структурной поврежденности мы считаем метод определения объемной плотности металла, которая может быть измерена на вырезках или сколах из труб паропровода по результатам прецизионного взвешивания образцов. Эта характеристика, как показано в ряде работ [10, 11], является универсальным критерием эксплуатационной надежности металла, отражающим влияние свойств материала и фактических условий его эксплуатации.

Сущность метода [11] заключается в сопоставлении плотности металла в исходном состоянии, когда практически поры в нем отсутствуют, после различных сроков эксплуатации и в момент разрушения. Критерием поврежденности металла считают отношение объема пор в момент времени  $V_t$  к объему пор в момент разрушения  $V_p$ :

$$\omega = \frac{V_t}{V_p} \quad (1)$$

Принято, что в исходном состоянии поврежденность материала  $\omega = 0$ , а в момент разрушения  $\omega = 1$ .

Объемная доля пор в металле в момент времени  $t$  рассчитана по формуле:

$$V_t = \frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_{исх}}, \quad (2)$$

где  $\rho_{исх}$  — плотность металла в исходном состоянии;  $\rho_t$  — то же, в момент времени  $t$ .

Накопление дефектов в металле (пористость) приводит к естественному снижению его плотности, поэтому одним из простых и физически обоснованных методов исследования поврежденности является прецизионное взвешивание.

Плотность металла измеряли по методу гидростатического взвешивания [11] с точностью до  $\pm 0,0001$  г на образцах массой от 5 до 20 г.



Микроповрежденность металла и остаточная деформация гибов паропроводов различных рабочих параметров и срока службы

Номер п/п	Оборудование	Узел	Рабочие параметры		Марка стали	Наработка, тыс. ч	Максимальная остаточная деформация, %	Оценка поврежденности по шкале [6], балл	
			$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Котлы ТП-170, ТП-15, ТП-47 Турбины ПТ-60-90/13	Главный паропровод, сборный коллектор, пароперепускные трубы	540	10,0	12X1MФ	69	0,43	1-2	
			535	9,0		111	0,44	1-2	
						148	0,53	2	
						166	0,3	1	
						305	0,49	2	
						319	0,77	3-4	
					344	0,26	1-2		
2	Котлы БКЗ-210-140ПТ Турбины ПТ-50-130/7	Пароперепускные трубы Гибы пароохладителя Котлы	550	14,0	12X1MФ	76	0,49	1-2	
			545	13,0		154	0,50	1-2	
						194	0,59	2	
						201	0,48	1-2	
3	Котлы ТГМП-344А Турбины Т-250/300-240	Паропровод «острого» пара Пароперепускные трубы	545	25,5	12X1MФ	139	0,37	2-3	
			540	24,0		150	0,36	1-2	
						173	0,1	1	
						180	0,44	2-3	
						202	0,53	2	
				545	4,0	15X1M1Ф	138	0,33	1-2
				540	3,85		142	0,21	2-3
					3,7		153	0,66	2
							157	0,66	2
							168	0,53	2
							183	0,36	3-4
				214	0,86	2			
				227	0,62	3-4			
4	Котлы ТГМ-96А Турбины Т-100-130	Паропровод «острого» пара Пароперепускные трубы	560	14,0	15X1M1Ф	102	0,59	1	
			555	13,0	12X1MФ	210	0,55	2	
						210	0,76	1	
						221	0,47	2	
						235	0,53	2	
						241	0,49	2	
					256	0,50	2		
5	Котлы ТПП-210А Турбины К-300-240	Паропровод «острого» пара Паропровод «горячего» промперегрева Пароперепускные трубы	545	25,5	12X1MФ	118	0,2	1	
			540	24,0	15X1M1Ф	191	0,51	1	
				3,7		207	0,45	2	
				3,6		222	0,87	4-6	
						234	0,57	2	
						250	0,52	1-2	

Для исследования степени поврежденности гнутой трубы паропровода вырезали образец у внешней поверхности вершиныгиба. Это позволяет оценить объемную интегральную пористость металла у поверхности и в подповерхностном слое трубы, т. е. в наиболее вероятной зоне риска в условиях эксплуатации при повышенной рабочей температуре и напряжениях.

Плотность исследуемого металла определяется по формуле:

$$\rho_t = \frac{P_{\text{возд}} d_{\text{вод}} - P_{\text{вод}} d_{\text{возд}}}{P_{\text{возд}} - P_{\text{вод}}} \text{ (г/см}^3\text{)}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{возд}}$ ,  $d_{\text{вод}}$  — соответственно плотность воздуха и воды при данной температуре и давлении (справочные данные);  $P_{\text{возд}}$ ,  $P_{\text{вод}}$  — масса образца на воздухе и в воде.

Полученную величину плотности исследуемого металла нужно сопоставить с плотностью его в исходном состоянии и в момент разрушения. Для каждой марки стали в состоянии после типовой термообработки эти характеристики постоянны. Так, плотность стали 12X1MФ в исходном состоянии составляет 7,835 г/см<sup>3</sup>, а в момент разрушения 7,778 г/см<sup>3</sup> [11]. Как видно из этих данных, дефект плотности при разрушении стали составляет всего 1...1,25 %, что требует обеспечения указанной высокой точности при проведении эксперимента.

Для расчета остаточного ресурса металла используется эмпирическая зависимость относитель-

Для расчета остаточного ресурса металла используется эмпирическая зависимость относитель-



ного времени до разрушения  $t/t_p$  от величины поврежденности  $\omega$ , полученной экспериментально по описанной методике. Кривая

$$t/t_p = f(\omega) \quad (4)$$

для стали 12Х1МФ показана на рис. 3.

Результаты исследования паропроводных труб, разрушенных вследствие ползучести, подтверждают справедливость такого подхода к прогнозированию ресурса [10].

Ниже, в качестве примера, приводятся данные контроля состояния металла трех труб паропроводов в/д, отработавших различные сроки эксплуатации.

1. Гиб пароперепускной трубы диаметром 219×25 мм из стали 12Х1МФ турбины Т-100-130-3, с номинальной рабочей температурой 545 °С и давлением 13,0 МПа, разрушился после 215 тыс.ч эксплуатации. Парковый ресурс указанногогиба в соответствии с [2] составляет 165 тыс. ч.

Повреждение представляет собой продольный разрыв растянутой частигиба трубы в виде хрупкой прерывистой трещины ползучести длиной 335 мм и раскрытием до 3 мм (рис. 4, а). На внешней поверхностигиба выявлена сетка тонких трещин, развивающихся параллельно магистральной на глубину ~ 1/3 сечения трубы.

Остаточная деформация поврежденной трубы, измеренная на прямом участкегиба, не превышает половину допустимой (0,4 % [2]) и составляет 0,38 %, скорость ползучести, измеренная на вершине растянутой частигиба, выше допустимой ( $0,8 \text{ \%}/\text{ч} \cdot 10^{-5}$  [2]) и составляет  $0,93 \text{ \%}/\text{ч} \cdot 10^{-5}$ . Овальностьгиба 1,3...2,1 %.

В зоне повреждения выявлены межкристаллитные макротрещины, заполненные окислами, и множество микротрещин ползучести (рис. 4, б). По границам зерен имеются цепочки пор и крупные (2 мкм) единичные поры (рис. 4, в),

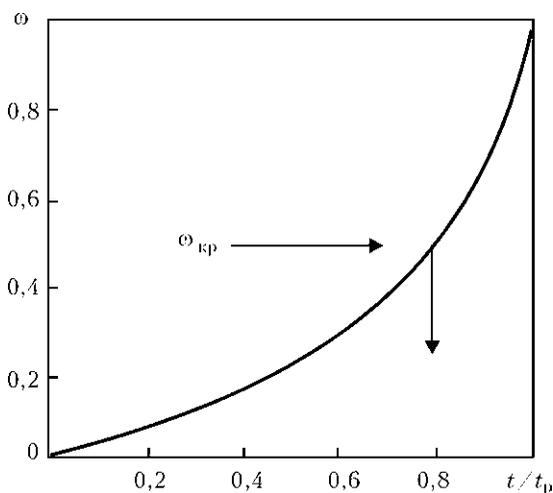


Рис. 3. Зависимость относительного времени до разрушения от величины поврежденности стали

что соответствует баллу 5 шкалы [6]. Микроструктура металлагиба деградирована, состоит из феррита и обособленных карбидов.

Прецизионное взвешивание образцов, вырезанных из растянутой частигиба, показало снижение плотности до  $7,767 \text{ г}/\text{см}^3$ . Величина поврежденности  $\omega$  здесь близка к 1, что соответствует истощению ресурса металла.

2. На главном паропроводе «острого пара» блока 100 МВт после 143 тыс. ч эксплуатации при номинальной рабочей температуре 560 °С и давлении 14,0 МПа произошло повреждениегиба трубы диаметром 325×38 мм из стали 12Х1МФ. Парковый ресурс указанногогиба в соответствии с [2] составляет 75 тыс. ч.

Повреждение имеет вид продольной прерывистой сквозной трещины длиной 380 мм с раскры-

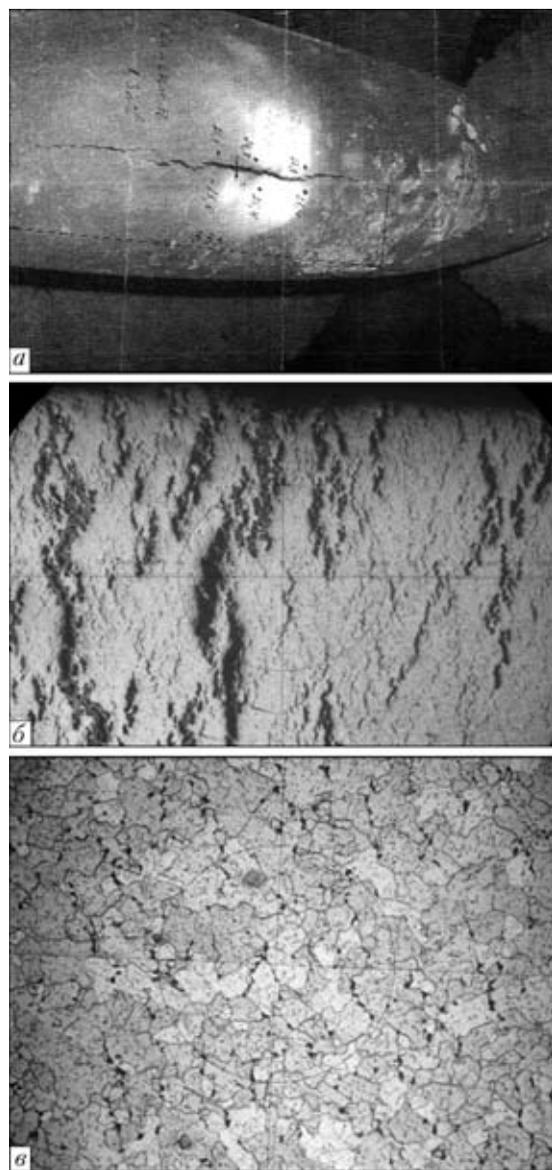


Рис. 4. Общий вид поврежденной трубы (а) и микроструктура металла трубы в зоне повреждения: б — ×100; в — ×500



тием до 2,5 мм, расположенной на растянутой части гйба.

Остаточная деформация поврежденной трубы, измеренная на прямом участке гйба, превышает половину допустимой и составляет 0,43 %, скорость ползучести за последние 15 тыс.ч. эксплуатации превышает допустимую и составляет  $1,1 \text{ \%}/\text{ч} \cdot 10^{-5}$ . Овальность гйба снизилась до 1,1 %.

В металле гйба выявлены цепочки пор и большое количество межкристаллитных макро- и микротрещин, развивающихся от наружной поверхности растянутой зоны.

Процесс накопления поврежденности протекает на фоне структурных изменений, связанных с полной дифференциацией микроструктуры.

Прецизионное взвешивание образцов поврежденной трубы показало локальное снижение плотности на растянутой части гйба до  $7,645 \text{ г}/\text{см}^3$ . Величина поврежденности  $\omega$  здесь более 1, что соответствует полному исчерпанию ресурса.

Таким образом, поврежденность оказывается более чувствительной характеристикой состояния металла, чем измеренная стандартным методом величина остаточной деформации и коррелирует со скоростью ползучести трубы. Так, деформация разрушенных гйбов 1,2 ниже допустимой, а ресурс, оцененный по поврежденности, исчерпан, что соответствует фактическому состоянию металла.

3. При плановом техническом диагностировании блока 250 МВт после 44 тыс. ч эксплуатации при температуре 545 °С и давлении 25,5/3,8 МПа была выявлена повышенная остаточная деформация труб паропровода «горячего» промперегрева. На гнутых трубах паропровода диаметром 630X25 мм из стали 15X1M1Ф деформация превышала допустимую и составляла 0,43...1,05 %, скорость роста деформации также была недопустимой —  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ \%}/\text{ч}$ . Парковый ресурс паропровода в соответствии с [2] составляет 270 тыс. ч.

Один из деформированных гйбов с максимальной скоростью роста деформации был исследован на вырезках.

Как показал металлографический анализ, микроструктура металла гйба была в удовлетворительном состоянии, без выраженных признаков старения. Микропоры и другие микродефекты в металле трубы отсутствовали.

Эти результаты подтвердились при определении плотности металла гйба, которая оказалась близкой к нормальной —  $7,8168 \text{ г}/\text{см}^3$ .

Было показано, что выявленная в данном случае деформация гйбов определяется, главным образом, изменением формы (овальности) нежесткого сечения так называемых «тонкостенных» труб во времени эксплуатации и не связана с процессами накопления микроповрежденности и развитием ползучести металла.

По результатам экспертно-технического анализа полученных данных была разрешена дальнейшая эксплуатация паропровода на номинальных параметрах до наработки паркового ресурса при условии учащенного диагностирования гйбов с деформацией, превышающей половину допустимой. Для повышения надежности работы указанного паропровода была произведена замена на пяти гйбов, на которых деформация составляла 0,84...1,05 %, что превышает допустимую даже для прямых труб (1,0 % [2]).

К настоящему времени паропровод отработал 168 тыс. ч без повреждений.

**Технология диагностирования и оценка остаточного ресурса паропроводов по уровню микроповрежденности металла.** Как следует из приведенных данных, величина фактической плотности является структурно чувствительной характеристикой, отражающей суммарную поврежденность стали и определяющей ее остаточный ресурс.

Верхней границей надежности для Ст–Мо–V теплоустойчивых сталей можно считать степень поврежденности  $\omega = 0,5 \dots 0,6$ . После достижения этой величины  $\omega$  накопление поврежденности идет ускоренно и эксплуатация стали становится опасной. Допустимый срок службы может быть установлен по величине рассчитанного остаточного ресурса металла. При получении нулевого ресурса или близкого к нулевому (до 10 тыс. ч.) трубы паропровода подлежат замене.

Задача прогнозирования остаточного ресурса паропроводов в/д в системе Киевэнерго решается путем оценки интегральной, накопленной в процессе длительной эксплуатации, микроповрежденности металла.

На основе обобщения данных мониторинга энергооборудования в процессе эксплуатации длительностью до 350 тыс. ч принята технология прогнозирования остаточного ресурса паропроводов в/д по результатам структурного анализа степени поврежденности металла в сочетании со стандартными методами диагностирования.

На первом этапе выполняется неразрушающий металлографический контроль на репликах гйбов диагностируемого паропровода, отработавшего парковый ресурс, с выявлением микропор, их размеров и распределения в структуре металла. Исследуются все гйбы с остаточной деформацией более половины допустимой, овальностью менее 2 %, неудовлетворительной твердостью, или неудовлетворительными данными дефектоскопии.

Если гйбы с неудовлетворительными характеристиками на паропроводе отсутствуют, проводится контроль не менее трех гйбов каждого типоразмера и марки стали паропровода.

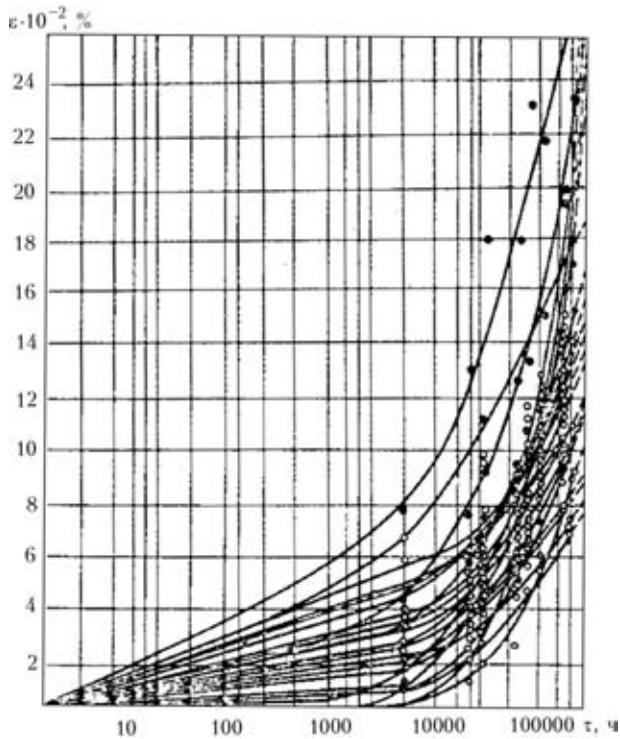


Рис. 5. Кривые роста остаточной деформации ползучести труб паропровода в процессе эксплуатации при 560 °С и давлении 14,0 МПа

По результатам контроля решается вопрос возможности дальнейшей эксплуатации паропровода.

В случаях, когда выявленная микрповрежденность металла труб не превышает допустимую, паропровод допускается к работе. Срок разрешенной эксплуатации определяется (качественно) с учетом наработки, условий эксплуатации и результатов диагностирования.

Если в числе исследованных имеются гибы с недопустимой поврежденностью [2, 6], вопрос о возможности и сроках дальнейшей эксплуатации паропровода может быть решен обоснованно по результатам определения остаточного ресурса металла. На этом этапе прогнозирования проводится вырезка из одной, худшей по результатам диагностирования, гнутой трубы паропровода для определения объемной плотности дефектов в металле и расчета по этой величине остаточного ресурса. Полученные данные исследования худшей гнутой трубы паропровода — «лидера» — используются для определения долговечности паропровода в целом.

Выбор трубы «лидера» из числа исследованных труб с недопустимым уровнем поврежденности может быть сделан по результатам анализа измерений деформации ползучести труб паропровода после различных сроков эксплуатации, представленных графически в виде зависимостей:

$$\varepsilon = f(\lg \tau), \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — остаточная суммарная относительная деформация ползучести, %;  $\tau$  — время работы, ч.

При рассмотрении серии кривых ползучести, относящихся к трубам одного паропровода (рис. 5), виден начальный период стабильности, за которым следует развитие процесса накопления деформации ползучести с постоянной скоростью. В то же время при наблюдении общей закономерности процесса, отмечаются существенные различия кривых ползучести, связанные с состоянием структуры металла и локальными особенностями условий эксплуатации данной трубы.

Построение серии кривых ползучести для данного паропровода позволяет легко выявить гибы с повышенной степенью деформации и скоростью ползучести и из них сделать выбор «лидера» для вырезки.

Многолетний опыт применения метода прогнозирования остаточного ресурса по структурной микрповрежденности в энергосистеме Киевэнерго позволяет считать предложенную технологию мониторинга состояния металла одним из современных подходов к решению проблемы оптимальной и экономичной эксплуатации паропроводов высокого давления.

## Выводы

Интегральным критерием эксплуатационной надежности паропроводов в/д из сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф является фактическая накопленная микрповрежденность металла.

Представлены способы оценки поврежденности стали микропорами неразрушающим методом металлографического анализа и прецизионного определения плотности пор в материале на вырезках.

Предложена технология прогнозирования остаточного ресурса долговечности металла паропроводов в/д по уровню микрповрежденности.

1. ДНАОП 0.00.1.11–98. Правила будови та технічної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води.
2. СОУ-Н МПЕ 40.1.17.401:2004. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. — Нормативний документ Мінпаливенерго України.
3. Векслер Е. Я., Чайковский В. М. Современные методы контроля структуры и свойств металла энергооборудования. — Изд. Укр. республ. науч.-техн. общества энергетики и электротехнической пром-ти. — Киев, 1982. — С. 62.
4. Неразрушающие методы контроля механических свойств металла энергооборудования в процессе длительной эксплуатации по твердости с использованием современных переносных твердомеров / Е. Я. Векслер, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов, Е. В. Семешко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 1. — С. 39–42.
5. Опыт неразрушающего контроля механических свойств металла энергооборудования по твердости / Е. Я. Векслер, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов, Е. В. Семешко // Энергетика та електрифікація. — 2008. — № 3. — С. 18–21.
6. ОСТ 34-70-690–96. Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации. — М.: ВТИ, 1998.



7. *Теория ползучести и длительной прочности металлов / И. А. Одинг, В. С. Иванова, В. В. Бурдукский, В. И. Геминюв. — М.: Машгиз, 1959. — 420 с.*
8. *ГОСТ 5639. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.*
9. *ТУ 14-3-460-2003. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.*
10. *Векслер Е. Я., Чайковский В. М. Оценка поврежденности и прогнозирование остаточного ресурса металла паропроводов высокого давления после длительной эксплуатации // Энергетика та електрифікація. — 1994. — №4. — С. 9-14.*
11. *Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В. Долговечность металла в условиях ползучести. — М.: Metallургия, 1988. — 380 с.*

*Энергоналадка Киевэнерго,  
Киев*

*Поступила в редакцию  
08.07.2009*



**EF** European Federation for  
Non-Destructive Testing  
**NDT**



The Russian Society  
for Non-Destructive Testing  
and Technical Diagnostics

## 10<sup>th</sup> EUROPEAN CONFERENCE and EXHIBITION on NDT

2010, June 7-11, Expocentr, Moscow

[www.ecndt2010.ru](http://www.ecndt2010.ru)

Phone: +7 499 2467132, Fax: +7 499 2468888  
e-mail: [info@ecndt2010.ru](mailto:info@ecndt2010.ru), [exhibition@ecndt2010.ru](mailto:exhibition@ecndt2010.ru)

# NDT - basis of Safety!