



РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ

Ф. А. ХРОМЧЕНКО, д-р техн. наук, Р. Н. КАЛУГИН, инж. (ОАО «ВТИ», г. Москва, РФ)

Рассмотрен методологический подход расчетно-экспериментальной оценки остаточного ресурса паропроводов для условий ползучести по длительной прочности и структурному состоянию (микрповрежденности) металла сварных соединений.

Ключевые слова: энергоустановки, сварные паропроводы, длительная прочность, ползучесть, остаточный ресурс, запас прочности

Методологический подход, разработанный и используемый ОАО «ВТИ» при решении задачи оценки остаточного ресурса сварных соединений паропроводов [1–4], основан на сочетании расчетно-экспериментальных методов оценки по длительной прочности металла и структурному состоянию (микрповрежденности) сварных соединений паропроводов в условиях ползучести (рис. 1 и 2).

Расчетно-экспериментальный метод оценки по длительной прочности. Этот метод реализуется в различных вариантах в зависимости от наличия информации о жаропрочности металла: нормативной (по [5]) номинальной оценки длительной прочности основного металла — стали $[\sigma_{д.п}^{д.м}] = 1,5[\sigma]$, где $[\sigma]$ — допускаемые напряжения на сталь (отклонение $\pm 20\%$ номинальных значений); базовой длительной прочности сварных соединений $\sigma_{д.п}^{с.с}$ (отклонение $\pm 10\%$), по данным многолетних исследований ОАО «ВТИ» [4]; фактической остаточной долговечности сварных соединений $\sigma_{д.п(ф.о)}^{с.с}$ по результатам испытаний на длительную прочность образцов сварных стыков, вырезанных из эксплуатируемого паропровода. Допускаемыми являются напряжения $[\sigma]$, назначенные для данной марки стали при заданной температуре и расчетный ресурс паропровода; значения $[\sigma]$ регламентированы нормами расчета на прочность [5].

Расчетные эквивалентные напряжения $\sigma_{э.кв}$ определяются как суммарные от действия всех видов нагрузок (внутреннего давления, весовых нагрузок, самокомпенсации от теплового расширения) с помощью упрощенного подхода [1–4] и/или уточненного [5], но обязательно с учетом особенностей конструктивно-технологического оформления сварных соединений: утонения толщины

стенки за счет расточки внутренней поверхности трубных элементов под подкладное кольцо; возможного дополнительного разупрочнения металла шва при ползучести $\sigma_{\omega}^{м.м} = 0,95...1,00$, концентрации напряжений от формы шва и сварной детали. Расчет $\sigma_{э.кв}$ производится по фактическим нагрузкам или консервативным способом из условия $\sigma_{э.кв} \leq 1,5[\sigma]$.

При упрощенном подходе, при котором эквивалентные напряжения оцениваются консервативным способом из условия $\sigma_{э.кв} \leq 1,5[\sigma]$, полученные значения $\sigma_{э.кв}$ принимаются равными для одностип-



Рис. 1. Общий алгоритм расчетно-экспериментальной оценки остаточного ресурса сварных соединений паропроводов

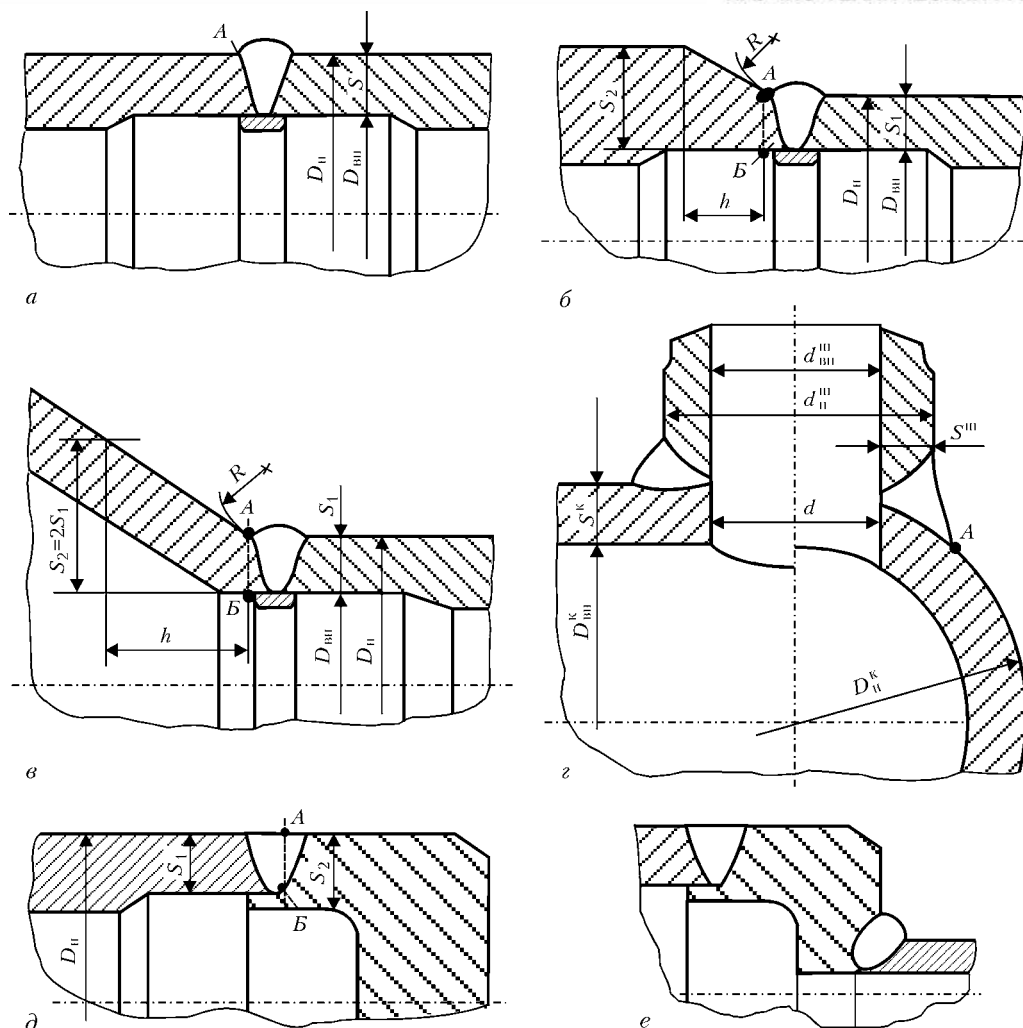


Рис. 2. Расчетные модели сварных соединений паропроводов [6]: а – стыковое сварное соединение трубных элементов с одинаковой толщиной стенки (ССС); б, в – стыковые сварные соединения разнотолщинных трубных элементов (ССС_{р.т.э}), в том числе с толстостенным патрубком (в) и коническим переходом (в); г – тройниковое (или штуцерное) сварное соединение (ТСС или ШСС); д – стыковое сварное соединение трубы с доннышком (ССС_д); е – штуцерное сварное соединение патрубка с доннышком (ШСС_д); А, Б – точки максимальных напряжений

ных сварных соединений по конструкции, размеру и марке стали деталей на данном паропроводе. При уточненном подходе $\sigma_{экр}$ определяется по фактическим нагрузкам, которые выявляются из результатов обследования опорно-подвесной системы и формоизменения трассы паропровода. В этом

случае значения $\sigma_{экр}$ будут различными для тех же однотипных сварных соединений в зависимости от их расположения на трассе паропровода и соответственно условий нагружения на участках трассы.

Остаточный ресурс сварных соединений оценивается из разности:

Таблица 1. Рекомендуемые периодичность и объемы эксплуатационного контроля в зависимости от запаса прочности сварных соединений паропроводов из хромомolibденованадиевых сталей при $T \geq 510$ °С

КО	Запас прочности	Периодичность контроля методами МПД, УЗК, МАР стыковых сварных соединений, тыс. ч		Объем контроля сварных соединений (%) методами			
				МПД, УЗК		МАР	
		Тип 1	Тип 2	Тип 1	Тип 2	Тип 1	Тип 2
1	$n_d \geq 1,5$	50	50	20	100	0	10
2-3	$1,5 \geq n_d \geq 1,3$	40...50	20...30	20	100	10...15	20...30
4-5	$1,3 \geq n_d \geq 1,2$	30...40	15...20	40...50	100	20...25	40...50
6-7	$1,2 \geq n_d \geq 1$	20...30	10...15	100	100	40...50	100

Примечания. 1. Объемы и периодичность последующего контроля уточняются по результатам поверочного расчета на прочность по фактическим типоразмерам сварных соединений и результатам диагностирования. 2. Контролю в указанном объеме и с указанной периодичностью подвергаются сварные соединения каждого типоразмера. В первую очередь контролируются сварные соединения на участках паропровода, примыкающих к котлу, у неподвижных опор и пускорегулирующей арматуры, а также соединения с утонченной стенкой трубных элементов и/или имеющие ремонтные (подварочные) швы. 3. Тип 1 – СССР по [6] (рис. 2, а); тип 2 – СССР_{р.т.э} [6] (рис. 2, б-е); МПД – магнитно-порошковая дефектоскопия; УЗК – ультразвуковой контроль; МАР – металлографический анализ с помощью реплик.

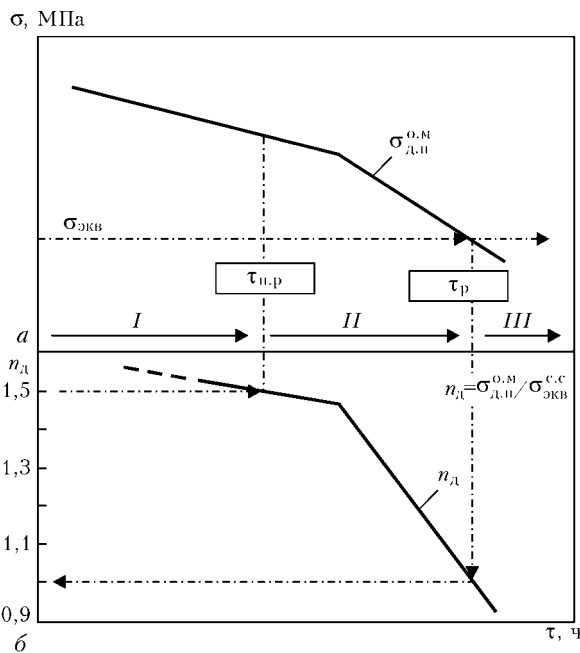


Рис. 3. Схема определения ресурса (а) и запаса прочности (б) сварных соединений по номинальной долговечности основного металла $\sigma_{д.п}^{o.m}$ в условиях ползучести: τ_p — предельный ресурс, тыс. ч, $n_d = 1$; $\tau_{и.р}$ — индивидуальный ресурс, тыс. ч, $n_d \geq 1$; $\sigma_{экв}^{c.c}$ — расчетные эквивалентные напряжения от действия всех видов нагрузок с учетом ϕ_ω и $\phi_{\omega\omega}$, МПа (ϕ_ω — коэффициент прочности сварных соединений с поперечным швом для условий растягивающих нагрузок; $\phi_{\omega\omega}$ — то же для изгибающих нагрузок); I — период надежной эксплуатации (удовлетворяются условия, $n_d \geq 1,5$); II — период возможной дальнейшей эксплуатации, $1 \leq n_d < 1,5$ (требуется увеличенный контроль сварных соединений); III — период рискованной (опасной) эксплуатации

$$\tau_{o.p} = \tau_{и.р} - \tau_n \text{ (тыс. ч),}$$

где $\tau_{и.р}$ — индивидуальный ресурс (или предельный ресурс τ_p для запаса прочности $n_d = 1$, рис. 3 и 4), который устанавливается по результатам сопоставления длительной прочности стали $\sigma_{д.п}$ с $\sigma_{экв}$ с учетом допустимых приемлемых значений n_d ; τ_n — длительность наработки.

Такой вариант решения задачи является типовым, при этом запас прочности сварных соединений определяется из отношения $n_d = \sigma_{д.п} / \sigma_{экв}$. Запас прочности находится, исходя из периода наработки $n_{д.п}$ и срока остаточного ресурса $n_{д.o.p}$, по схемам, представленным на рис. 3 и 4, с последующей оценкой категории опасности (КО) сварных соединений, которая вычисляется из установленной в ОАО «ВТИ» линейной зависимости с граничными значениями КО = 1 (сварные соединения высокой надежности) и КО = 7 (низкой надежности). По установленным значениям КО назначаются уточненные объемы и периодичность последующего эксплуатационного контроля сварных соединений (табл. 1).

При решении поставленной задачи по фактической остаточной длительной прочности сварных соединений остаточный ресурс устанавливается от периода наработки паропровода (периода вырезки сварных соединений для исследований) до предельного срока τ_p , характеризующего предельное состояние металла $n_d = 1$, т. е. остаточный ресурс

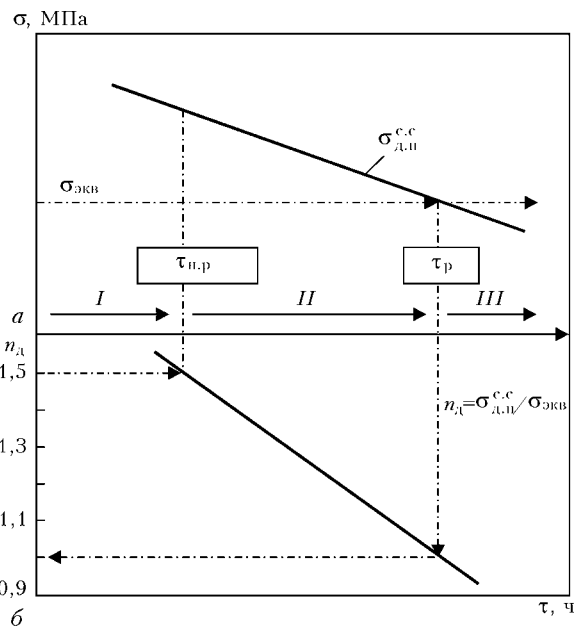


Рис. 4. Схема определения ресурса (а) и запаса прочности (б) сварных соединений по их длительной прочности $\sigma_{д.п}^{c.c}$ ($\sigma_{экв}$ вычисляется без учета ϕ_ω и $\phi_{\omega\omega}$)

оценивается преимущественно из расчета $\tau_{o.p} = \tau_p - \tau_n$.

Из сравнительного анализа эффективности этих методов вытекает следующее:

наиболее корректным для оценки $\tau_{o.p}$ (но одновременно наиболее трудоемким и дорогостоящим) является метод определения ресурса по фактической остаточной длительной прочности сварных соединений с расчетом $\sigma_{экв}$ по фактическим нагрузкам; при этом методе оценки ресурса коэффициент достоверности КД $\geq 70\%$;

менее точными (консервативными в сторону запаса прочности), но в то же время более экономичными и оперативными являются методы определения ресурса по нормативной номинальной длительной прочности стали с расчетом $\sigma_{экв}$ по упрощенному подходу (КД $\geq 20\%$);

промежуточное положение занимает метод, основанный на использовании базовой долговечности сварных соединений с $\sigma_{экв}$, оцененных по упрощенному подходу (при отсутствии данных по фактическим нагрузкам) (КД $\geq 40\%$).

Расчетно-экспериментальный метод по структурному фактору. Этот метод применяется для экспрессной оценки остаточного ресурса сварных соединений по фактическому состоянию металла (микрповрежденности) в наиболее напряженных зонах. С этой целью для определения зон контроля расчетным способом оценивается конструкционная прочность сварных соединений по признакам запаса по толщине стенки трубных элементов в местах расположения швов S/S_0 (S_0 — расчетная толщина стенки по [5]); относительной равнотолщинности трубных элементов в сварном соединении $\beta = D_{н}/D_{вн}$ ($D_{н}$, $D_{вн}$ — соответственно наружный и внутренний диаметр трубного элемента в месте сварного шва); ослабления корпуса тройника отверстием под штуцер $d_o/(D_{н}^k - 2S_{ф}^k)$ (d_o — диаметр



Таблица 2. Классификация сварных соединений по параметрам конструкционной прочности с рекомендуемыми объемами контроля методом МАР на паропроводах из стали 12Х1МФ и 15Х1М1Ф

Тип сварного соединения (см. рис. 2)	Параметр конструкционной прочности (ПКП)	ПКП для групп			Объем контроля (%) для групп			Место расположения сварного соединения на трассе паропровода
		1	2	3	1	2	3	
ТСС (ШСС)	$d_o / (D_n^k - 2S_\phi^k)$	>0,75	<0,75	<0,75	100	50	25	На любом участке (в первую очередь в районе перемычек и пускорегулирующей арматуры и устройств)
	S^k / S_0^k	1,0...1,2	1,3...1,5	$\geq 1,6$	100	50	25	
	S^m / S_0^m	1,0...1,2	1,3...1,5	$\geq 1,6$	100	50	25	
CCC _{р.т.а} CCC _а	S / S_0	1,0...1,2	1,3...1,5	$\geq 1,6$	100	40	20	То же и вблизи расположения неподвижных опор
ССС	S / S_0	1,0...1,2	1,3...1,5	$\geq 1,6$	100	20	10	Вблизи неподвижных опор и на перемычках в местах примыкания к тройникам

Примечания. 1. Первоочередному контролю сначала подлежат сварные соединения 1-й, а затем 2-й и 3-й группы. 2. Кроме того, первоочередному контролю подлежат сварные соединения, характеризующиеся следующими признаками: отремонтированные, имеющие подварочные швы; соединения, в которых выявлена неоднородность твердости по зонам $HB_{0,3} / HB_{0,3} < 1$; ранее оцененные категорией опасности КО ≥ 3 . 3. Условные обозначения: D_n^k – наружный диаметр трубопровода корпуса тройника; S_ϕ^k – фактическая толщина стенки корпуса тройника в зоне углового шва, определяемого УЗК; S^k, S^m – номинальная толщина соответственно стенки корпуса и штуцера тройника; S_0^k, S_0^m, S_0 – расчетная толщина стенки соответственно корпуса тройника, штуцера и трубного элемента стыковых соединений (определяется по нормам расчета на прочность); S – номинальная толщина стенок трубных элементов; $HB_{0,3}$ – твердость соответственно металла шва и основного металла.

отверстия; D_n^k, S_ϕ^k – наружный диаметр и фактическая толщина стенки корпуса тройника в месте расположения углового шва, определяемого УЗК). Классификация сварных соединений по параметрам конструкционной прочности (табл. 2) и обоснование зон контроля осуществляются по методике, изложенной в [4].

Металлографический анализ в установленных зонах диагностирования выполняется с помощью реплик (на срезах металла или переносным микроскопом). По его результатам определяется исчерпание ресурса (табл. 3), и с учетом длительности наработки τ_n устанавливается срок остаточного ресурса $\tau_{o,p} = \tau_p - \tau_n$. При этом предельный ресурс τ_p оценивается из отношения τ_n / τ_p (исчерпание ресурса) для данного сварного соединения. Оценка остаточного ресурса сварных соединений по такому методу производится в соответствии с разработанным ОАО «ВТИ» отраслевым руководящим документом [7].

Этот метод отличается высокой достоверностью, поскольку отражает комплексное влияние различных факторов (технологических, конструктивных и эксплуатационных) на фактическое состояние металла – деградацию структуры и свойств в виде микро- вплоть до макроповрежденности наиболее слабых участков сварных соединений. Кроме того, указанный метод является достаточно оперативным и маневренным и используется на тепловых электростанциях. Однако его применение связано с определенной трудоемкостью выполнения вспомогательных подготовительных операций (шлифовки и полировки мест контроля, съема и размещения теплоизоляции, установки временных лесов и др.) и точностью выбора зон контроля (без проведения предварительной оценки конструкционной прочности сварных соединений по фактическим размерам трубных элементов в месте расположения сварных швов).

В зарубежной теплоэнергетике МАР с помощью реплик для сварных соединений паропроводов применяется в объеме 50... 100 % [4].

Комплексное использование расчетно-экспериментальных методов оценки по длительной прочности и структурному фактору (см. рис. 1). Этот подход позволяет получать наиболее точные результаты оценки остаточного ресурса сварных соединений. При нем метод оценки по длительной прочности рассматривается как первоочередной и необходимый для определения общей работоспособности сварных соединений на период наработки (оценка индивидуального и остаточного ресурса, запаса прочности и КО, назначение контроля). В этом случае результаты расчетно-экспериментальных исследований распространяются на однотипные (по марке стали, конструкции, размеру) сварные соединения независимо от их расположения на трассе паропровода; при оценке $\sigma_{экр}$ по фактическим нагрузкам учитывается расположение соединений на трассе паропровода.

Метод оценки ресурса по структурному фактору позволяет оценить $\tau_{o,p}$ и КО соединений с учетом их реального нагружения исходя из расположения на трассе паропровода. При этом первоочередному диагностированию, как правило, подлежат сварные соединения, которые по результатам предыдущего расчетно-экспериментального метода вызывают сомнения.

Подтверждением служит сравнительная оценка $\tau_{o,p}$ и КО сварных соединений паропровода ОП энергоблока мощностью 300 МВт станции № 5 Костромской ГРЭС по результатам расчетно-экспериментальных исследований, проведенных ОАО «ВТИ» (табл. 4). Так, для ТСС с помощью расчетно-экспериментального метода оценки по длительной прочности металла остаточный ресурс классифицирован как исчерпанный $\tau_{o,p1} = 0$ и КО = 7 независимо от расположения ТСС на трассе паропровода. По результатам последующего диагностирования ТСС и расчетно-экспериментальной



Таблица 3. Категория опасности и исчерпание ресурса сварных соединений в зависимости от микрповрежденности металла при ползучести на паропроводах

КО	Вид поврежденности металла по [7]	Классификация поврежденности металла [7]		Исчерпание ресурса τ_n/τ_p		Сроки следующего контроля, тыс. ч	
		Стадия	Этап	сталь 12Х1МФ	сталь 15Х1М1Ф	Тип 1	Тип 2
1	—	Ип	—	$\leq 0,50$	$\leq 0,60$	По [6]	
2	Единичные поры плотностью $\rho \leq 100/\text{мм}^2$	IIп	—	0,50...0,60	0,60...0,75	40...50	20...25
3	То же, но $\rho \leq 250/\text{мм}^2$	IIIп	III.1п	0,61...0,70	0,68...0,75	15...20	10...15
4	То же, но $\rho \leq 1000/\text{мм}^2$		III.2п	0,70...0,76	0,75...0,80	10...15	7...10
5	То же, но $\rho > 1000/\text{мм}^2$		III.3п	0,76...0,82	0,80...0,85	7...8	7...8
6	Цепочки мелких пор размером 1...2 мкм	IVп	IV.1п	0,82...0,87	0,85...0,89	7...8	7...8
	Цепочки укрупненных пор, слившиеся поры и/или скопления пор, микротрещины		IV.2п	0,87...0,92	0,89...0,93	5...7	5...7
7	Микро- и макротрещины	Vп	V.1п V.2п	0,92...1,00	0,93...1,00	3...4	3...4

Примечания. 1. КО оценивается следующим образом: безопасная (КО = 1), незначительно ухудшенная (КО = 2); слабоопасная (КО = 3); повышенной опасности (КО = 4); весьма опасная (КО = 5); значительно рискованная (КО = 6); критическая (КО = 7), при которой возможно разрушение сварного соединения. При ситуации КО = 3 может быть назначен ремонт, при КО = 4+6 ремонт обязателен, в случае КО = 7 необходимо выполнить немедленный ремонт или переварку сварного соединения.

оценки по структурному фактору сроки остаточного ресурса устанавливали для каждого типа сварного соединения, они уточнялись и характеризовались в диапазоне $\tau_{o,p2} = 14...123$ тыс. ч с соответствующим $КО_2 = 1,0...6,1$. Аналогично были проведены операции по определению остальных типоразмеров ССС и ССС_{р.т.э} (табл. 4).

Другим примером является комплексный подход, разработанный в ОАО «ВТИ», к оценке остаточного ресурса на основе использования базовой долговечности сварных соединений в сочетании с методом диагностирования с помощью реплик. На первой стадии по результатам расчетно-экспериментальных исследований оценивается предельный

ресурс τ_p по длительной прочности сварных соединений с последующим уточнением остаточного ресурса по структурному фактору (рис. 5). Период τ_{In} устанавливается по [7]. Начиная с этого периода назначается диагностирование методом МАР для последующего уточнения остаточного ресурса сварных соединений.

ОАО «ВТИ» проводит на договорных условиях работы по оценке ресурса сварных соединений паропроводов с разработкой регламента контроля для многих тепловых электростанций, в том числе Костромской ГРЭС, Рязанской ГРЭС, Новочеркасской ГРЭС, Сургутской ГРЭС-2, Новогорьковской ТЭЦ и др.

По результатам комплексных расчетно-экспериментальных исследований с учетом накопленного опыта эксплуатации и результатов статистического анализа результатов контроля и повреждаемости можно отметить, что после наработки 100 тыс. ч при температуре 545 °С на паропроводах энерго-

Таблица 4. Сравнительные сроки $\tau_{o,p}$ и КО, установленные расчетно-экспериментальными методами оценки сварных соединений паропровода ОП из стали 15Х1М1Ф (наработка 185 тыс. ч при температуре 545 °С и давлении 25,5 МПа)

Тип сварного соединения (см. рис. 2)	$D_n \times S$, мм	Остаточный ресурс, тыс. ч		КО ₁	КО ₂	Номер сварного соединения на схеме паропровода
		$\tau_{o,p1}$	$\tau_{o,p2}$			
ССС	325×60	215	>123	1	1	15, 18, 4
	325×60	215	79	1	2,1	7
ССС _{р.т.э}	325×60 + Ду200	50	>123	4	1	70, 71
ТСС	325×60 245×45	0	>123	7	1	76а, 78а
		0	79	7	2,1	77а
		0	43	7	4	68а
		0	14	7	6,1	31а, 75а

Примечания. 1. $\tau_{o,p1}$ и КО₁ установлены расчетно-экспериментальным методом по длительной прочности металла; $\tau_{o,p2}$ и КО₂ оценены методом расчета по структурному фактору (микрповрежденности) металла. 2. Сварные соединения ССС относятся к типу 1, а ССС_{р.т.э} и ТСС — к типу 2 по [6]. 3. У ССС_{р.т.э} трубные элементы изготовлены из стали 15Х1М1ФЛ.

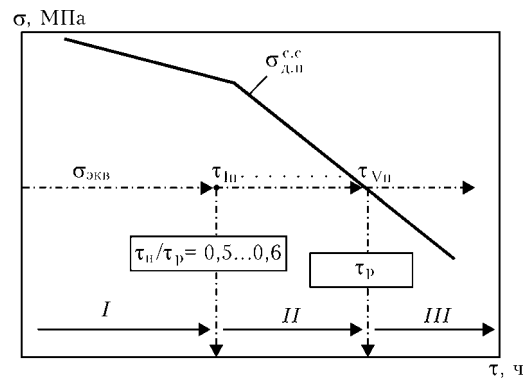


Рис. 5. Схема комплексного подхода к определению предельного ресурса τ_p по длительной прочности сварных соединений $\sigma_{д.п}^{с.с}$ с последующей оценкой остаточного ресурса $\tau_{o,p} = \tau_p = \tau_n$ через τ_n/τ_p методом оценки по структурному фактору; τ_{In} — период, оцениваемый по [7]; этапы I–III — соответственно период надежной, возможной и рискованной (опасной) эксплуатации. На этапе II необходимо диагностирование по [7]



установок мощностью 300 МВт и менее остаточный ресурс сварных соединений характеризуется следующими сроками: 150...300 тыс. ч для ССС; 50...200 тыс. ч для ССС_{р.т.э} и до 50...100 тыс. ч для ТСС (см. рис. 2).

Для сварных соединений паропроводов энергоблоков мощностью 800 МВт остаточный ресурс более ограничен.

1. Хромченко Ф. А., Ланна В. А., Калугин Р. Н. Диагностика и ресурс сварных соединений паропроводов ТЭС // Свароч. пр-во. — 2001. — Ч. 2. — 2001. — № 8. — С. 21–24; Ч. 3. — 2001. — № 9. — С. 15–19.
2. Хромченко Ф. А., Федосеев А. В., Ланна В. А. Оценка остаточного ресурса длительно эксплуатирующихся сварных соединений паропроводов // Теплоэнергетика. — 1995. — № 4. — С. 12–16.

3. Хромченко Ф. А., Ланна В. А., Калугин Р. Н. Диагностика и прогнозирование ресурса сварных соединений паропроводов // Электрические станции. — 2001. — № 7. — С. 55–62.
4. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов. — М.: Машиностроение, 2002. — 352 с.
5. РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и паропроводов пара и воды / АООТ «НПО ЦКТИ», 1999.
6. РД 10-262-98 (РД 153-34.1-17.421-98). Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. — М.: СПО ОРГРЭС, 1999.
7. РД 153-34.1-17.467-2001. Экспрессный метод оценки остаточного ресурса сварных соединений коллекторов котлов и паропроводов по структурному фактору. — М.: АООТ «ВТИ», 2001.

A procedural approach is considered to design-experimental evaluation of residual life of steam pipelines for creep conditions by long-term strength and structural condition (microdamage) of welded joint metal.

Поступила в редакцию 12.03.2003

Новости НКМЗ

НКМЗ осваивает выпуск сушильных машин

В настоящее время на НКМЗ (г. Краматорск, Донецкая область) спроектирована и изготовлена по заказу Центральной обогатительной фабрики (ЦОФ) «Кураховская» первая отечественная уникальная установка для сушки энергетического шлама. Ее создание продиктовано сложившейся ситуацией перенакопления шлама, остающегося на фабриках после первого углеобогащения, но еще пригодного в производстве. Как правило, этот шлам повышенной влажности сваливается в специальные шламохранилища, занимающие большие и дорогостоящие ныне земельные угодья. Новая сушильная машина обеспечит возможность углеобогатительным фабрикам сразу же после первой переработки стандартной угольной массы проводить ее повторное обогащение, доводя до требуемых норм, и реализовывать потребителю для повторного применения. Одна сушилка способна обогащать в год до 40 тыс. т шлама. Таким образом, появляется возможность экономить земельные богатства, уменьшить загрязнение окружающей среды.

Для сушки продуктов обогащения угля предназначена и современная барабанная сушилка, которая будет поставлена ЦОФ «Комендантская» объединения «Ровенькиантрацит».