

О ДИАГНОСТИКЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ. II. О РАСЧЕТЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛА, ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕГОСЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ

В.С. Пермикин

Обсуждается возможность расчета остаточного ресурса металла, эксплуатирующегося в условиях ползучести, по степени микроповрежденности его структуры эксплуатационными микродефектами — микропорами ползучести. В предлагаемом варианте расчета основным параметром является удельное количество микропор ползучести, то есть количество микропор в единице площади металлографического шлифа. Приведены общие формулы для расчета ресурса и остаточного ресурса металла, в частности, формулы расчета остаточного ресурса для наиболее распространенной в энергетике стали 12Х1МФ (1Cr0,3Mo0,25V).

Ключевые слова: ползучесть, микропоры, ресурс.

ВВЕДЕНИЕ

Первая часть статьи, опубликованная достаточно давно, была посвящена описанию датчиков и устройств (тандемов из датчиков) для измерения скорости у. з. волн [1]. Задержка с выходом продолжения статьи вызвана следующими причинами.

При первых же экспериментах по измерению скорости у. з. волн в металле с микропорами ползучести было обнаружено отклонение наблюдаемого изменения скорости ультразвука (2—3 %) от ожидаемого (1 %). Ожидаемое значение было получено при расчетах в предположении, что данная задача относится к области рассеяния Рэлея — длина волны у. з. волн составляет несколько миллиметров, что значительно превышает размеры микронных микропор ползучести.¹

Это несоответствие долго не находило объяснения. Исследования, направленные на прояснение этого несоответствия, позволили установить, что при ползучести по границам зерен металла образуются компактные микрорыхлоты, а в микропоры на металлографическом шлифе они превращаются в результате декорирования — многократной полировки и травления поверхности шлифа [2]. Описанию этих исследований будет посвящена следующая статья.

Немалым препятствием к продолжению публикации служило и то обстоятельство, что основным базовым методом, с помощью которого проводится диагностика процесса ползучести, является металлографический метод. А он, как известно, не относится к числу неразрушающих, по крайней мере в своем классическом применении (обычно металлографические исследования проводят на образцах, вырезанных из детали.) Однако технология применения металлографического метода при контроле энергооборудования (при диагностике процесса ползучести) вполне позволяет отнести его к числу неразрушающих методов контроля. Применяется он в данном случае следующим образом. Готовят металлографичес-

¹ В случае разрушения металла по механизму ползучести известны предвестники появления макротрещин — микропоры и клиновидные макротрещины размером в несколько микрон. Образуются эти микродефекты по границам зерен металла задолго до появления макротрещин.

кий шлиф не на образце, а непосредственно на детали, участок поверхности детали последовательно шлифуют, полируют и травят для выявления микроструктуры. Шлиф просматривают с помощью портативного микроскопа, изображение интересующих деталей микроструктуры (фазовых и структурных составляющих, микродефектов) фиксируют на фотоаппарат или с помощью видеокамеры непосредственно на компьютер [3]. Если на деталь невозможно установить портативный микроскоп, то со шлифа готовят пластиковый оттиск (снимается реплика), который изучается на стационарном микроскопе уже в лабораторных условиях [4, 5]. В этом случае разрушения детали не происходит, а накладным металлографическим “датчиком” является либо сам портативный микроскоп, либо реплика (оттиск).

Сегодня под термином “микрповрежденность” в энергетике для металла, эксплуатирующегося в условиях ползучести, понимают степень пораженности его микроструктуры возникающими при эксплуатации микродефектами — межзеренными микропорами ползучести. Микропоры наблюдают через окуляр микроскопа при увеличении 500 и более раз на шлифе после его специальной подготовки (многократного повторения цикла: “полировка + травление”). Степень поврежденности микроструктуры микропорами является основным критерием при определении возможности дальнейшей эксплуатации элементов высокотемпературного паропровода отработавших свой нормативный (“гарантийный”)² срок [6]. Однако в настоящее время сама оценка микрповрежденности носит качественный или полуколичественный характер и проводится путем сравнения изображения оцениваемой микроструктуры с эталонными изображениями пяти- или семибалльной шкалы [7, 8].

Полуколичественная оценка микрповрежденности, возможно, и является основной причиной того, что расчет ресурса и остаточного времени эксплуатации (остаточного ресурса) по результатам исследования микроструктуры, то есть фактического состояния металла, не проводится.

В условиях сложившегося положения в энергетике, когда замена элемента, детали или узла происходит только после их разрушения, количественная оценка состояния и расчет остаточного ресурса по степени микрповрежденности металла становятся насущно необходимыми. И в первую очередь потому, что разрушение некоторых “ползущих” элементов и особенно гибов³ высокотемпературных паропроводов приводит к большим разрушениям, а нередко и к человеческим жертвам.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ВЫВОД ОСНОВНЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

В данной статье приведена методика расчета остаточного ресурса металла, эксплуатирующегося в условиях ползучести, по степени его микрповрежденности. В этом расчете основным параметром является удельное количество микропор ползучести, то есть количество микропор в единице площади металлографического шлифа (далее — n , шт/мм²). Методика основана на следующих экспериментальных фактах:

1) существуют два состояния микрповрежденности микроструктуры, которые мы наблюдаем на шлифе: межзеренные микропоры ползучести либо есть, либо их нет;

² Или гарантируемый. В энергетике вместо гарантийного срока утвердился термин “парковый ресурс”.

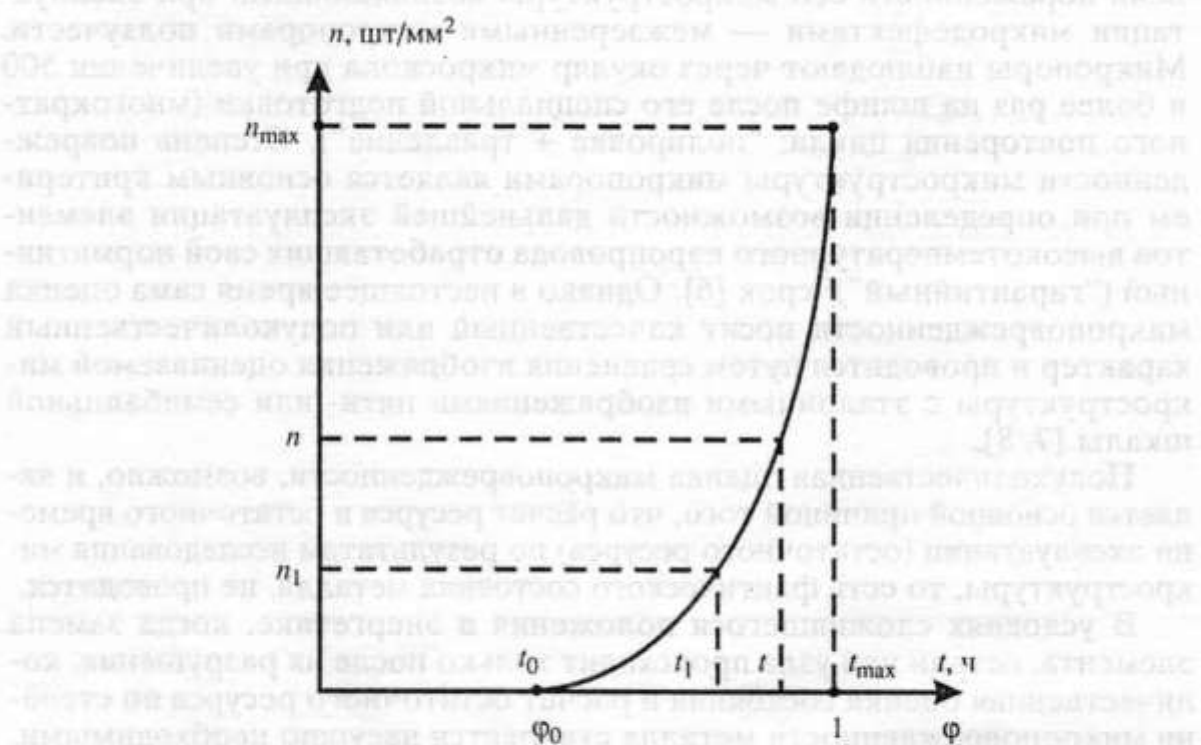
³ Гиб — гнутый элемент (гнутая труба) трубопровода.

2) микроповрежденность, то есть удельное количество межзеренных микропор n , с течением времени возрастает; и двух менее очевидных утверждениях:

3) возрастание удельного количества межзеренных микропор n с течением времени может быть достаточно хорошо описано степенной параболической функцией;

4) существует предельное состояние микроповрежденности, которое характеризуется максимальным удельным количеством микропор ползучести (n_{\max} , шт/мм²), после достижения которого (при $t = t_{\max}$) изменяется механизм разрушения: начинают образовываться микротрещины и далее растут трещины⁴.

Принимая во внимание все четыре факта, зависимость микроповрежденности от времени можно представить графически, что и показано на рисунке.



Зависимость удельного (n , шт/мм²) количества межзеренных микропор ползучести от времени эксплуатации (t , ч) и от относительного параметра времени эксплуатации ($\varphi = t/t_{\max}$).

Аналитически график, представленный на рисунке, может быть описан следующими формулами:

$$n = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_0; \\ a \left(\frac{t-t_0}{t_{\max}} \right)^m, & \text{при } t_0 \leq t < t_{\max}; \\ n_{\max}, & \text{при } t = t_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

⁴ Макро- и микротрещины — дефекты, раскрытие которых больше, чем “характерный” размер микропор. Под “характерным” размером мы понимаем размер микропоры в направлении максимальных действовавших при эксплуатации нормальных напряжений.

где a — коэффициент, который определяется ниже; t_0 — время начала образования первых межзеренных микропор ползучести, или:

$$n = \begin{cases} 0, & \text{при } \varphi < \varphi_0; \\ a(\varphi - \varphi_0)^m, & \text{при } \varphi_0 \leq \varphi < 1; \\ n_{\max}, & \text{при } \varphi = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где $\varphi = t/t_{\max}$ — относительный параметр времени; φ_0 — относительное время начала образования первых межзеренных микропор ползучести.

Исходя из четвертого утверждения о существовании предельного состояния микроповрежденности, найдем выражение для коэффициента a , тогда основные (средние) формулы систем (1) и (2) примут вид:

$$n = n_{\max} \left(\frac{t - t_0}{t_{\max} - t_0} \right)^m; \quad (3)$$

$$n = n_{\max} \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{1 - \varphi_0} \right)^m. \quad (4)$$

Пусть на одном и том же участке элемента (детали) последовательно для двух моментов времени (например, при первом — t_1 и втором обследовании — t) получены два значения удельной плотности микропор n_1 и n . Тогда по этим значениям из (3) и (4) могут быть найдены t_0 — время начала образования микроповрежденности ползучести и значение ресурса элемента t_{\max} ⁵.

$$t_0 = \frac{t_1 \left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^{1/m} - t \left(\frac{n_1}{n_{\max}} \right)^{1/m}}{\left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^{1/m} - \left(\frac{n_1}{n_{\max}} \right)^{1/m}}; \quad (5)$$

$$t_{\max} = \frac{t \left[1 - \left(\frac{n_1}{n_{\max}} \right)^{1/m} \right] - t_1 \left[1 - \left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^{1/m} \right]}{\left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^{1/m} - \left(\frac{n_1}{n_{\max}} \right)^{1/m}}. \quad (6)$$

Из (6) с учетом равенства

$$t + t_{\text{ост}} = t_{\max} \quad (7)$$

можно найти и остаточный ресурс обследуемого элемента:

$$t_{\text{ост}} = \frac{(t - t_1) \left[1 - \left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^{1/m} \right]}{\left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^{1/m} - \left(\frac{n_1}{n_{\max}} \right)^{1/m}}. \quad (8)$$

⁵ t_{\max} вполне можно считать индивидуальным ресурсом элемента, если шлиф приготовлен на самом поврежденном участке.

Из (5) и (6) можно найти и относительное время начала возникновения наблюдаемой микроповрежденности $\varphi_0 = \frac{t_0}{t_{\max}}$:

$$\varphi_0 = \frac{t_1 \left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^{1/m} - t \left(\frac{n_1}{n_{\max}} \right)^{1/m}}{t \left[1 - \left(\frac{n_1}{n_{\max}} \right)^{1/m} \right] - t_1 \left[1 - \left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^{1/m} \right]} \quad (9)$$

Аппроксимируя закономерность нарастания микропор ползучести степенной параболической функцией с учетом существования предельного состояния микроповрежденности, мы уже при втором измерении удельного количества микропор имеем возможность вычислить момент начала образования микропор, ресурс и остаточный ресурс исследуемого "ползущего" металла (при известном показателе степени m).

Если φ_0 известно из предыдущих экспериментов, то остаточный ресурс можно выразить с помощью формул (3), (6), (7) следующим образом:

$$t_{\text{ост}} = t \frac{(1 - \varphi_0) \left[1 - \left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^{1/m} \right]}{\varphi_0 + (1 - \varphi_0) \left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^{1/m}} \quad (10)$$

О ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПАРАМЕТРОВ, ВХОДЯЩИХ В ФОРМУЛЫ

Совпадает ли время образования первых микропор с моментом отклонения от установившейся ползучести? Этот вопрос остается открытым. Но, возможно, ответ на этот вопрос того же свойства, что ответ на вопрос, что мы понимаем под пределом упругости?

На практике под пределом упругости понимают напряжение, при котором определена достаточно малая, но заметная (в смысле возможности ее измерения) остаточная деформация. Если считать, что последняя — ускоренная стадия ползучести связана с уменьшением "живого сечения" детали из-за образования по границам зерен металла микрорыхлот ползучести [2]⁶, то при таком определении оба момента времени (начало ускоренной стадии ползучести и момент появления на шлифе первых микропор) если и отличаются, то на малую величину.

К настоящему времени накоплено достаточно много экспериментальных данных об относительной длительности третьей (ускоренной) стадии ползучести. Так, в [9, стр. 134] утверждается, что "часто, даже когда ис-

⁶ В этой работе утверждается, что в металле на ускоренной стадии ползучести образуются межзеренные микрорыхлоты и микропоры ползучести, которые мы наблюдаем на шлифе после его специальной подготовки — многократного повторения цикла "полировка + травление", это результат декорирования (растравливания) этих микрорыхлот.

пытания проводят при постоянных напряжениях, III стадия может занимать примерно половину общего времени ползучести до разрушения” и приведены данные по результатам исследования чистого серебра и сплава Нимоник-90, подтверждающие данное утверждение.

В работе [10, рис. 6] приведены результаты экспериментов по определению удельного количества микропор в зависимости от степени истощения ресурса в стали 1Cr1/2Mo (аналог стали 15ХМ). Из этих экспериментов следует, что время начала образования наблюдаемых на металлографическом шлифе микропор ползучести составляет половину от общего времени испытания до образования трещин.

При исследовании микроповрежденности нескольких сотен гибов из стали 12Х1МФ повторно и трижды с интервалами между обследованиями от 5 до 50 тыс. ч получены следующие данные: если сталь 12Х1МФ эксплуатируется при $t = 540—560$ °С и напряжениях 4—7 кгс/мм², то длительность III стадии ползучести составляет 50—60 % от общего времени эксплуатации (до появления трещин)⁷. Основываясь на этих результатах, в качестве первого приближения для стали 12Х1МФ можно принять $\varphi_0 = 0,45$.

Зависимость удельного количества микропор от времени для стали 1Cr0,5Mo, представленная в [10, рис. 6], близка к квадратичной. По результатам исследований, проведенных предприятием УралОРГРЭС для стали 12Х1МФ (1Cr0,3Mo0,25V), эта зависимость также близка к квадратичной и можно принять, что показатель степени $m = 2$.

Предельное значение удельного количества микропор n для стали 1Cr0,5Mo, представленное в этой же работе [10, рис. 6], составляет примерно 7000 шт/мм². Предельное значение удельного количества микропор ползучести зависит от величины зерна (чем больше величина зерна, тем крупнее микропоры и их удельное количество меньше). Для стали 12Х1МФ (1Cr0,3Mo0,25V) при удельном количестве зерен (шт/мм²) 1600—3000 шт/мм² (для восьмого балла удельное количество зерен, определенное по шкалам 1, 2 Приложения 2 [7], равно 2200 ± 100 шт/мм²) $n_{\max} = (6000—7000)$ шт/мм² [9]. ¹¹ ¹²

Обобщая все вышепредложенное для определения экспериментального остаточного ресурса “ползущих” элементов (деталей) высокотемпературных паропроводов, изготовленных из стали 12Х1МФ по экспериментальным данным (по результатам количественной оценки микроповрежденности микроструктуры микропорами ползучести), предлагаются следующие формулы:

Экспериментальный остаточный ресурс для стали 12Х1МФ

$$t_{\text{ост}}^{\text{экспер}} = 0,55t \frac{1 - \sqrt{\frac{n}{6000}}}{0,45 + 0,55 \cdot \sqrt{\frac{n}{6000}}}, \quad (11)$$

где t — время эксплуатации на момент проведения контроля микроповрежденности; n — удельное количество микропор ползучести на шлифе (количество микропор на 1 мм² плоскости шлифа);

Безопасный остаточный срок эксплуатации

$$t_{\text{ост}}^{\text{безопасн}} \leq K t_{\text{ост}}^{\text{экспер}}, \quad (12)$$

⁷ Данные получены на предприятии УралОРГРЭС [11].

где K — коэффициент осторожности или коэффициент консервативности; ($K \leq 1$) — учет возможных ошибок, в том числе и ошибки при определении самого поврежденного места на детали (значение K тем ближе к единице, чем точнее определено положение самого поврежденного места).

Коэффициент K не должен учитывать неумение приготовления шлифа, поскольку это неумение может быть скорректировано только одним значением коэффициента — значением, равным 0.

Балл по ГОСТ [1]	Удельное количество микропор, шт/мм ²	Экспериментальный остаточный ресурс, ч	Безопасный остаточный срок эксплуатации, ч	
			$K = 0,5$	$K = 0,75$
1	0	122 000*	≤61 000	≤91 000
4	2000	46 000 30 000	23 000 15 000	34 000 22 000
5	3000	31 000 16 000	17 000 8 000	25 000 12 000

* Все значения округлены в меньшую сторону до тысяч часов.

Пусть наработка детали на момент контроля составила 100 тыс. ч. В таблице приведены результаты расчетов экспериментального остаточного ресурса и для двух значений K (0,5 и 0,75) безопасного остаточного срока эксплуатации.

ВЫВОДЫ

Подводя итоги, перечислим условия, которые должны быть выполнены, чтобы можно было доверять результатам расчета.

Формула (11) и расчеты справедливы при следующих условиях.

1. Если они применяются для стали 12Х1МФ, которая эксплуатировалась при температуре 540—560 °С.

2. Подсчет удельного количества микропор проводится на нетравленном шлифе (после подготовки шлифа “на поры”, но перед его последним травлением “на структуру”).

3. Величина зерна стали соответствует восьмому баллу ГОСТ 5639—82.

4. Есть уверенность, что:

шлиф приготовлен правильно, то есть все микропоры выявлены;

металл на участке, где приготовлен шлиф, имеет наибольшую для данной детали микроповрежденность;

проведен неразрушающий контроль металла, предусмотренный действующей нормативно-технической документацией, и не обнаружены дефекты, размеры которых превышают браковочный уровень;

численные значения констант $m = 2$; $n_{\max} = 6000$ шт/мм²; $\phi_0 = 0,45$ достаточно точно определены.

Если нет уверенности в точности значений констант, то можно провести исследования самостоятельно и по его результатам принять другие значения m и n_{\max} , а затем воспользоваться последовательно формулами (5), (6), (8) и (9) и определить ϕ_0 .

Предложение применять приведенные в данной статье формулы ни в коем случае нельзя считать претензией на оригинальность суждений. Это предложение преследует цель следовать хоть какому-то алгоритму, а не принимать волевых решений при определении остаточного ресурса, глядя на фотографию микроструктуры с микропорами ползучести.

Если применять единый алгоритм расчета остаточного ресурса, то со временем по мере накопления данных отклонение от данного алгоритма будет проявляться все отчетливее. Проявление этого отклонения послужит причиной для уточнения (или вообще изменения) алгоритма, то есть данную статью нужно понимать, как предложение применять единый количественный алгоритм определения остаточного ресурса по результатам количественного определения микроповрежденности металла, эксплуатирующегося в условиях ползучести.

ООО "Научно-производственная
мастерская "Ньютона"

Поступила в редакцию
9 декабря 2010 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пермикин В.С. О диагностике ползучести теплостойких сталей по результатам измерения скорости ультразвуковых волн при неразрушающем контроле энергооборудования. I. Датчики и устройства для измерения скорости ультразвука.— Дефектоскопия, 2004, № 1, с. 46—58.
2. Пермикин В.С. Механизм разрушения стали при высокотемпературной ползучести.— Сб. докл. конференции "Металл оборудования ТЭС. Проблемы и перспективы".— М.: ВТИ, 2006, с. 124—128.
3. Пермикин В.С. Микроскоп металлографический портативный упрощенный. Методы и технические средства оперативной оценки структурно-механического состояния металла элементов конструкций и машин. Всероссийская научно-техническая конференция.— Сб. докл.— М.: МЭИ (ТУ), 2002, с. 169—171.
4. Кан Д.Е. Рекомендации по контролю микроструктуры металла методом оттисков.— М.: ОРГРЭС, 1969.— 14 с.
5. ISO 305:1998(E) "Non-destructive — Metallographic replica techniques of surface examination".— International standard, 1998, p. 2.
6. СТО 172 303 82.27.100.005—2003 (СО 153—34.17.470—2003) Инструкция о порядке обследования и продлении срока службы паропроводов сверх паркового ресурса.— М.: ЦПТИ ОРГРЭС, 2008.— 64 с.
7. СТО 172 302 82.27.100.005—2008 (ОСТ 34—70—690—96) Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации.— М.: ВТИ, 1997.— 44 с.
8. Добрушкин Л.С. Определение остаточного ресурса металла паропроводов высокого давления по результатам контроля микроповрежденности.— Сб. докл. "Металл оборудования ТЭС. Проблемы и перспективы".— М.: ВТИ, 2006, с. 113—115.
9. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов.— М.: Металлургия, 1973.— 328 с.
10. Дуфор Л. КЕМА Inspection Technology. Достоинства и применение метода кратковременных испытаний на длительную прочность при одноосном напряжении. Продление ресурса ТЭС.— Сб. докл. конференции.— М.: ВТИ, 16—20 мая 1994, т. 1.
11. НМ 443. Методические указания по обследованию металла гибов высокотемпературных паропроводов с применением метода оценки состояния по скорости поверхностных ультразвуковых волн.— Екатеринбург.: УралОРГРЭС, 1999.— 28 с.
12. ГОСТ 5639—82 (СТ СЭВ 1959—79). Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.— 22 с.