

УДК 621.311.22

Математическое моделирование состояния трубопроводов ТЭС, работающих в условиях ползучести

А.А. Митюшов¹, С.И. Шувалов²

¹ОАО «ОГК-2», Москва, Российская Федерация

²ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Иваново, Российская Федерация

E-mail: ShuvalovS@rambler.ru, tdmित्रиева@ogk6.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Надежность работы трубопроводов, работающих в условиях ползучести, зависит от наличия дефектов в металле в виде пор и микротрещин, интенсивность возникновения и развития которых определяется постоянно увеличивающейся пластической деформацией. Существующие модели прогнозирования используют среднестатистические характеристики, которые могут существенно различаться даже у однотипных элементов, работающих в одинаковых условиях. Для обоснованного прогноза необходима модель, адекватно отражающая процесс накопления дефектов и учитывающая индивидуальные особенности элементов.

Материалы и методы: Оценка связи между поврежденностью структуры и остаточной деформации основана на статистической обработке результатов диагностики состояния паропроводов острого пара и горячего промперегрева Рязанской ГРЭС, выполненных из стали 15Х1М1Ф. Вероятность появления отдельных классов микроповрежденности определена с помощью метода Байеса.

Результаты: Получена математическая модель, позволяющая рассчитать наиболее вероятные и гамма-процентные значения остаточной деформации и вероятности поврежденности металла порами и микротрещинами. Приведены значения параметров распределений для классов микроповрежденности структуры.

Выводы: Предлагаемая математическая модель рекомендуется для прогнозирования состояния металла гибов паропроводов и расчета остаточного ресурса.

Ключевые слова: гибы паропроводов, ползучесть, остаточная деформация, повреждаемость, прогноз состояния.

Mathematical Modeling of Thermal Power-plant Pipes State in Creeping Conditions

A.A. Mitushov¹, S.I. Shuvalov²

¹ The Second Generating Company of the Wholesale Power Market (JSC "OGK-2"), Moscow, Russian Federation

² Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: ShuvalovS@rambler.ru, dmitriykorovin@list.ru, tdmित्रиева@ogk6.ru

Abstract

Background: Reliability of the pipelines operating under creeping conditions depends on the defects in metal in the form of pores and microcracks, the intensity of which is determined by the development and the ever-increasing plastic deformation. The existing forecasting models use the average performance, which can vary widely even in the same type of elements working in the same conditions. For sound prediction the model that adequately reflects the accumulation of defects, and takes into account the individual characteristics of the elements, is necessary.

Materials and methods: Evaluation of the connection between the damaged structure and residual strain is based on the statistical analysis of the pipelines diagnostics results of live steam and hot reheats Ryazan GRES, made of steel 15H1M1F. The appearance probability of individual classed of microdamages is determined by the Bayes method.

Results: The mathematical model that calculates the most likely and gamma percentages of permanent deformation and the likelihood of damage metal pores and microcracks is developed. The parameters values of the distributions for classes of structure microdamages are provided.

Conclusions: The proposed mathematical model is recommended for predicting the state of the metal bends and calculating the remaining resource.

Key words: pipeline bends, creepng, residual deformation, damageability, prediction of condition.

Трубопроводы, работающие при высокой температуре и давлении пара, относятся к объектам, представляющим потенциальную опасность жизни и здоровью людей, которая может реализоваться в случае разрушения элементов трубопроводов.

В процессе ползучести происходят необратимые изменения, увеличивающие вероятность разрушения элементов: увеличивается

пластическая деформация элементов, в металле возникают и развиваются несплошности в виде пор и микротрещин, легирующие элементы переходят из основного металла в карбиды, снижается механическая прочность, у гибов паропроводов уменьшается овальность.

Нормативные материалы¹, регламентирующие условия работы и контроля состояния металла паропроводов, устанавливая предельные значения этих характеристик, при превышении которых эксплуатация элементов признается опасной и запрещается.

Наибольшие изменения структуры и свойств металла, приводящие к разрушению, происходят в гихах трубопроводов, поэтому состояние всего трубопровода оценивается по состоянию гивов. Диагностика состояния производится, как правило, во время капитальных ремонтов, т.е. не чаще, чем один раз в пять лет. При этом измерения одних параметров производятся при каждом обследовании, а другие параметры проверяются значительно реже.

При соблюдении требований² объем информации, получаемой при плановом контроле состояния, достаточен для достоверной оценки текущего состояния. Однако безопасность эксплуатации оборудования должна быть обеспечена не только на момент проведения обследования, но также на период будущей эксплуатации до следующего обследования. В этой связи актуальной становится задача прогнозирования состояния элементов оборудования на будущий период эксплуатации.

В общем случае для получения полной оценки состояния необходимо иметь информацию по каждому контролируемому параметру. Соответственно, по каждому параметру желателен прогноз изменения его величины в будущем. Для проведения такого прогноза необходимы математические модели, связывающие значения каждого параметра с конструкцией элемента и условиями его работы. В настоящее время для многих параметров такие модели отсутствуют, и по ним прогнозирование не проводится.

Из всего многообразия параметров следует выделить в наибольшей степени определяющие реальную возможность разрушения элементов: поврежденность микроstructures металла несплошностями и величину остаточной деформации [1]. Разрушение элементов трубопроводов в условиях ползучести всегда происходит вследствие возникновения микроповреждений структуры металла и развития их до микротрещин и затем до магистральной макротрещины. Так как процесс деградации микроstructures металла до появления микротрещин занимает достаточно длительный период времени, то при периодическом контроле можно выявить наступление опасного состояния элемента и заменить его, не доводя до разрушения. В свою очередь, в условиях пол-

зучести, когда подвижность зерен заметно увеличивается, существенным становится скопление по границам зерен и поворот зерен. Для того чтобы на границах зерен не возникали пустоты, перемещение зерен должно компенсироваться деформацией самих зерен, а именно – дислокационным скольжением или диффузией вакансий. Если этого не происходит в полной мере, то на границах зерен возникают новые и увеличиваются в размерах уже существующие пустоты в виде пор и микротрещин [2]. Таким образом, развитие пор и микротрещин в условиях ползучести инициируется главным образом пластической деформацией. Поэтому процессы накопления пластической (остаточной) деформации и поврежденности структуры металла порами и микротрещинами не являются независимыми, а представляют единый процесс накопления повреждений микроstructures под воздействием постоянно увеличивающейся в условиях ползучести пластической деформации.

Накопление повреждений микроstructures металла происходит по схеме, известной как шкала Нойбауэра [3] (рис. 1).

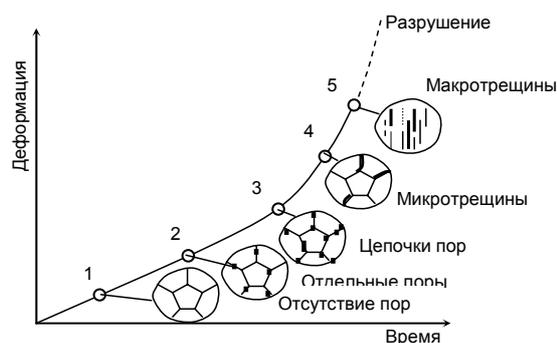


Рис. 1. Схема повреждения микроstructures металла по Нойбауэру

На начальной стадии процесса (точка 1) на шлифе металла под оптическим микроскопом видны четкие границы зерен, поры в металле отсутствуют. По мере накопления деформации границы зерен начинают размываться, на границах зерен появляются отдельные поры размером 0,05–0,3 мкм (точка 2). Далее количество пор увеличивается, они укрупняются до 2–5 мкм и образуют цепочки (точка 3). Цепочки сначала возникают около отдельных зерен, затем распространяются в пределах нескольких зерен, границы между отдельными порами утончаются, и цепочки переходят в микротрещины (точка 4). Далее микропоры и микротрещины охватывают обширные области материала, образуя несколько параллельных макротрещин (точка 5). Эти трещины развиваются внутрь поперечного сечения до тех пор, пока дальнейшее повреждение не сконцентрируется на одной магистральной трещине, приводящей к разрушению элемента. В соответствии с этой схемой предложена балльная

¹ СТО 17230287.27.100.005-2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. – М.: ОАО «ЕЭС России», 2008. – 658 с.

² Там же.

оценка микроповрежденности металла³, шкала которой представлена в табл. 1.

Таблица 1. Шкала микроповрежденности сталей перлитного класса

Балл	Характер поврежденности	Плотность пор
1	Поры отсутствуют	
2	Единичные поры	До 300 пор/мм
3	Множественные поры	До 700 пор/мм
4	Цепочки пор	До 1000 пор/мм
5	Множественные цепочки	До 2000 пор/мм
6	Микротрещины	До 3000 пор/мм
7	Макротрещины	Более 3000 пор/мм

Микроструктурный анализ состояния металла представляет собой трудоемкую процедуру и проводится в обязательном порядке только после исчерпания паркового ресурса (после 200–250 тыс. часов эксплуатации). База данных об изменении во времени баллов микроповрежденности крайне ограничена, поэтому сложно построить адекватную математическую модель, непосредственно описывающую процесс накопления микроповрежденностей и определить параметры идентификации модели.

Накопление пластической деформации в условиях ползучести исследовано более детально. Процесс ползучести соответствует схеме, представленной на рис. 2 [4].

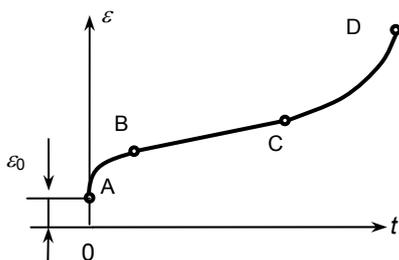


Рис. 2. Кривая ползучести металла

В начальный момент приложения нагрузки элемент получает мгновенную деформацию ε_0 , соответствующую отрезку OA. Участок AB представляет собой первую стадию ползучести, на которой вследствие разрушения крупных кристаллов и ориентации образовавшихся осколков по направлению скольжения происходит упрочнение материала. За счет этого скорость деформации монотонно уменьшается. После исчерпания способности материала к упрочнению (точка B) начинается вторая стадия ползучести с приблизительно постоянной скоростью до момента (точка C), когда величина деформации не станет достаточно большой. Далее наступает третья стадия ползучести (участок CD), когда из-за появления большого количества возникших

внутренних несплошностей или уменьшения площади сечения элемента при неизменной нагрузке действительные напряжения возрастают и скорость деформации увеличивается. Процесс ползучести заканчивается разрушением элемента в точке D.

Первая стадия ползучести не представляет практического интереса, так как в этот период накопление деформации и микроповрежденности незначительно. Для паропроводов ТЭС, работающих при температуре 545–560 °С, предельная деформация прямых участков гибов ограничена величиной 0,6–0,8 %⁴. При такой деформации влияние изменения площади сечения еще не заметно, и основному периоду эксплуатации паропроводов соответствует вторая стадия ползучести с постоянной скоростью деформации.

Тогда если на момент обследования наработка элемента составила t_1 часов и была выявлена деформация элемента ε_1 , то, согласно рис. 2, после будущей наработки в течение $\tau_{\text{прог}}$ можно ожидать деформацию

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + w \tau_{\text{прог}}, \quad (1)$$

где w – скорость деформации.

Анализ результатов измерений остаточной деформации гибов паропроводов различных электростанций показывает, что скорость деформации у однотипных элементов отдельных блоков и в ряде случаев параллельных ниток одного блока может существенно различаться. Более того, при относительно постоянной средней скорости локальные скорости одного элемента могут колебаться в достаточно широком диапазоне. В таком случае скорость w следует рассматривать как случайную величину, характеризуемую средним значением \bar{w} и дисперсией \bar{S}^2 .

Использование при прогнозе состояния средней скорости деформации \bar{w} будет означать, что с вероятностью 50 % в действительности деформация будет больше (и с вероятностью 50 % меньше). Для более осторожной оценки можно использовать значения гамма-процентной скорости, соответствующие границе доверительного интервала и рассчитываемую по формуле [5]

$$w_\gamma = \bar{w} + t_{\text{кр}}(\gamma, \nu) \sqrt{\frac{\bar{S}^2}{n}}, \quad (2)$$

где \bar{S}^2 – дисперсия значений скоростей в базе данных для элементов анализируемой группы; n – количество значений скоростей деформации (объем выборки) данной группы; ν – число степеней свободы, $\nu = n - 1$; $t_{\text{кр}}(\gamma, \nu)$ – параметр распределения Стьюдента, определяемый для уровня значимости γ и числа степеней свободы ν .

³ СТО 17230287.27.100.005-2008.

⁴ СТО 17230287.27.100.005-2008.

Следует обратить внимание на то, что в формулу (2) в качестве параметра входит объем выборки n . Для получения более достоверных оценок желательно сгруппировать результаты оценок скоростей деформации у однотипных элементов, предварительно убедившись, что различия средних значений и дисперсий статистически незначимы.

Наиболее вероятная величина остаточного ресурса рассчитывается как

$$\bar{\tau}_{\text{ост},\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\text{пред}} - \varepsilon_1}{\bar{w}} \quad (3)$$

Для более осторожной оценки можно использовать значение гамма-процентной скорости деформации.

Вероятность наступления предельного состояния $\gamma_{\text{пред}}$ после будущей наработки $\tau_{\text{прог}}$ определяется по значению параметра распределения Стьюдента:

$$t(\gamma_{\text{пред}}, \nu) = \left(\frac{\varepsilon_{\text{пред}} - \varepsilon_1}{\tau_{\text{прог}}} - \bar{w} \right) \sqrt{\frac{n}{S^2}} \quad (4)$$

Для оценки связи между величиной остаточной деформации и микроповрежденностью был проведен анализ результатов диагностики состояния гибов паропроводов острого пара и горячего промперегрева блоков 300 МВт Рязанской ГРЭС, изготовленных из стали 15X1M1Ф. Нормативными материалами⁵ предписывается немедленная замена гибов с поврежденностью выше четвертого балла, поэтому в базе данных количество результатов с пятым баллом ограничено, а с шестым и седьмым – отсутствует. Было показано [6], что распределение величины деформации внутри каждого из первых пяти баллов микроповрежденности соответствует логарифмически нормальному распределению с плотностью вероятности

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{m}\right)\right]^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

Параметры распределения m и σ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры распределения для классов микроповрежденности

Балл микроповрежденности	m	σ
1	0,187	0,719
2	0,275	0,522
3	0,320	0,389
4	0,377	0,289
5	0,761	0,322

В соответствии с теоремой Байеса, вероятность появления i -го балла микроповрежденности при деформации ε составит

$$p_\varepsilon(B_i) = \frac{n_i f_i(\varepsilon)}{\sum_{k=1}^5 n_k f_k(\varepsilon)} \quad (6)$$

где n_i – объем выборки для i -го класса микроповрежденности: $n_1 = 26$; $n_2 = 33$; $n_3 = 21$; $n_4 = 41$; $n_5 = 30$.

Распределения вероятностей поврежденности микроструктуры с соответствующими баллами, рассчитанные по (5) и (6), показаны на рис. 3.

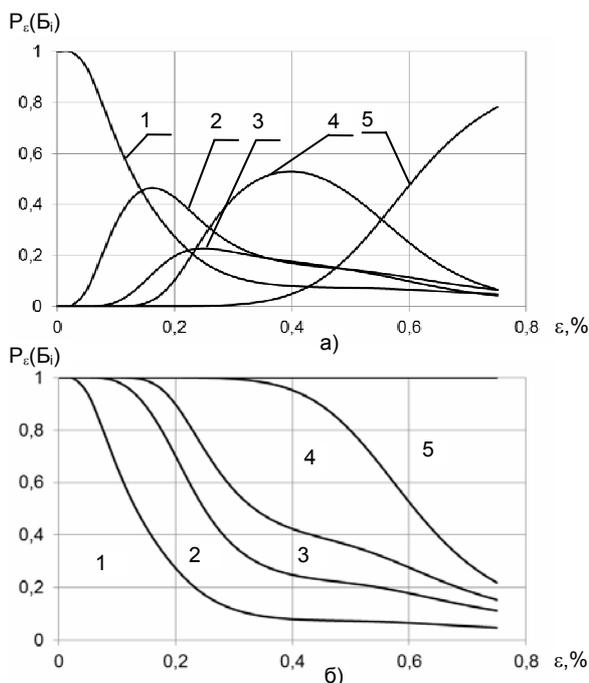


Рис. 3. Зависимости вероятности появления микроповрежденности структуры металла гибов паропроводов от величины остаточной деформации (номера соответствуют баллам микроповрежденности): а – индивидуальные; б – суммарные

В связи с тем, что измерения величины остаточной деформации гибов выполняются более просто и проводятся более часто по сравнению с измерением величины микроповрежденности, будем считать, что на начало выполнения прогноза состояния паропроводов имеются данные о величине деформации, хотя они могут относиться как к наработке на начало прогноза, так и к более раннему периоду. В таком случае реально могут возникнуть следующие варианты состава исходных данных:

- 1) на начало периода прогноза имеются результаты измерений остаточной деформации и микроповрежденности металла гига;
- 2) на начало периода прогноза имеются результаты измерений остаточной деформации, данные по микроповрежденности относятся к более раннему периоду;
- 3) на начало периода прогноза имеются результаты измерений микроповрежденности, данные по остаточной деформации относятся к более раннему периоду;

⁵ СТО 17230287.27.100.005-2008.

4) за весь период эксплуатации оборудования измерений микроповрежденности гига, для которого проводится прогнозирование состояния, не проводилось.

При первом варианте прогноза вероятность появления определенного балла микроповрежденности после наработки $\tau_{\text{прог}}$ определяется в следующей последовательности:

1) вычисляется ожидаемое значение величины остаточной деформации для средней или гамма-процентной скорости по (1);

2) рассчитываются безусловные вероятности появления i -го балла микроповрежденности $P_{\varepsilon}(B_i)$ по (5) и (6);

3) вероятность появления i -го балла микроповрежденности при условии, что на начало прогнозирования поврежденность структуры металла оценивалась баллом B_j , определяется по формуле

$$P_{\varepsilon}(B_j, B_i) = P_{\varepsilon}(B_i) k_{ji}, \quad (7)$$

где коэффициент перехода из поврежденности j -го балла в поврежденность i -го балла находится из условия невозможности снижения балла микроповрежденности по формуле

$$k_{ji} = \begin{cases} 0 & \text{при } i < j, \\ \frac{1}{\sum_{r=1}^{j-1} P_{\varepsilon}(B_r)} & \text{при } i \geq j. \end{cases} \quad (8)$$

Для определения остаточного ресурса по микроповрежденности необходимо задаться предельно допустимой величиной $P_{\varepsilon}(B_j, B_5)_{\text{доп}}$ и затем методом последовательных приближений, подбирая $\tau_{\text{прог}}$, по приведенной выше схеме найти искомую величину.

При втором варианте состава исходных данных, когда данные о микроповрежденности элемента относятся к более раннему периоду, определяются вероятности микроповрежденности на начало периода прогноза $P_{\varepsilon}(B_j, B_k)$, а затем рассчитываются вероятности состояния на конец периода прогноза по формуле

$$P_{\varepsilon}(B_j, B_i) = \sum_{k=j}^5 P_{\varepsilon}(B_j, B_k) \cdot P_{\varepsilon}(B_k, B_i). \quad (9)$$

Митюшов Алексей Александрович,
ОАО «ОГК-2»,
генеральный директор,
адрес: г. Москва, проспект Вернадского, д.101/3,
телефон (495) 428-53-01,
e-mail: tdmtrieva@ogk6.ru

Шувалов Сергей Ильич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-83-10,
e-mail: ShuvalovS@rambler.ru

При третьем варианте состава исходных данных сначала рассчитывается по (1) наиболее вероятная или гамма-процентная величина остаточной деформации, а затем по (7) и (8) находят вероятности баллов микроповрежденности.

При четвертом варианте исходных данных, когда отсутствуют результаты измерений состояния микроструктуры, вероятность появления баллов микроповрежденности оценивается по безусловным вероятностям, рассчитанным по (5) и (6).

Предлагаемая модель позволяет оценить состояние гибов паропроводов и величину индивидуального остаточного ресурса. Для получения достоверной оценки необходима база данных по наблюдаемой скорости деформации у прогнозируемого элемента и подобных ему.

Список литературы

1. Митюшов А.А. Выбор параметров для прогнозирования остаточного ресурса оборудования // V Юбилейная всеросс. науч.-практич. конф.: сб. докл. – Иваново, 2010. – С. 59–62.
2. Чадек Й. Ползучесть металлических материалов. – М.: Мир, 1987. – 304 с.
3. Петреня Ю.К. Физико-механические основы континуальной механики повреждаемости. – СПб.: АООТ «НПО ЦКТИ», 1997. – 147 с.
4. Качанов Л.М. Теория ползучести. – М.: Физматгиз, 1960. – 456 с.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
6. Митюшов А.А., Коровин Д.И., Шувалов С.И. Зависимость микроповрежденности стали паропроводов от величины остаточной деформации // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 2. – С. 12–15.

References

1. Mityushov, A.A. Vybora parametrov dlya prognozirovaniya ostatochnogo resursa oborudovaniya [Parameters Choice for Predicting Residual Life of Equipment]. *Sbomik dokladov V Yubileynoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The Vth Anniversary All-Russian Scientific and Practical Conference. Reports Book]. Ivanovo, 2010, pp. 59–62.
2. Chadek, Y. *Polzuchest' metallicheskih materialov* [Creeping of Metal Materials]. Moscow, Mir, 1987. 304 p.
3. Petrenya, Yu.K. *Fiziko-mekhanicheskie osnovy kontinental'noy mekhaniki povrezhdaemosti* [Physical and Mechanical Foundations of Continual Mechanics of Damageability]. Saint-Petersburg, AOOT «NPO TsKTI», 1997. 147 p.
4. Kachanov, L.M. *Teoriya polzuchesti* [Creep Theory]. Moscow, Fizmatgiz, 1960. 456 p.
5. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability Theory]. Moscow, Nauka, 1969. 576 p.
6. Mityushov, A.A., Korovin, D.I., Shuvalov, S.I. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 2, pp. 12–15.