

УДК 621.311.22

## Прогнозирование состояния гибов паропроводов по величине остаточной деформации

Шувалов С.И., д-р техн. наук, Митюшов А.А., инж.

Рассмотрена проблема прогнозирования состояния гибов паропроводов по результатам технической диагностики. Предложено оценивать изменение микрповреждаемости структуры металла по величине остаточной деформации, рассматривая процесс деградации металла в виде суперпозиции детерминированного процесса, обусловленного статическими нагрузками, и случайного процесса, связанного с переходными режимами работы оборудования. Для конкретизации условий эксплуатации предлагается кластеризация элементов по конструктивным параметрам и скорости изменения остаточной деформации и микрповреждаемости. Для получения вероятности достижения предельного состояния на заданный период будущей эксплуатации предлагается проводить статистическое моделирование процессов.

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

## Prediction of Bends State by Using Residual Deformation

S.I. Shuvalov, Doctor of Engineering, A.A. Mitushov, Engineers

The authors consider the prediction problem of bends state by using technical diagnostics results. The authors propose to estimate metal structure damageability according to the residual deformation. The article is devoted to the metal degradation process as the superposition of deterministic process with static loads, and stochastic process with the equipment operation transition conditions. To concretize the operational conditions the authors suggest the constructive parameters elements and changing speed of residual deformation and damageability. To receive statistical simulation of the maximum state for the mentioned period of the future operation the authors recommend to hold statistical modelling of the process.

*Key words:* bends state, creeping, residual deformation, damageability, prediction of the state.

Для обеспечения надежной и безопасной работы оборудования необходимо наличие возможности прогноза его состояния на период, по крайней мере, до проведения следующего обследования. Одним из наиболее ответственных элементов тепловых электростанций, представляющих реальную угрозу безопасности обслуживающего персонала, являются гибы паропроводов, работающих в условиях ползучести при относительно высокой температуре и умеренных напряжениях.

Вопросы организации диагностики, интерпретирования ее результатов и прогнозирования остаточного ресурса для элементов тепломеханического оборудования ТЭС регламентируются нормативными материалами [1, 2]. Устанавливаемые этими документами методики и объем диагностики обеспечивают получение достаточной информации для оценки текущего состояния оборудования, но достаточно грубо отражают динамику процессов старения оборудования. По-видимому, именно по этой причине в [2] разрешается отступление от рекомендуемой методики и отмечается, что величину индивидуального (остаточного) ресурса допускается определять другим способом. Руководящие указания Госгортехнадзора [3] устанавливают, что оценка будущего состояния потенциально опасных объектов должна базироваться на вероятностных моделях по параметрам технического состояния, при этом в качестве определяющих параметров технического состояния должны использоваться параметры, изменение которых (в отдельности или в некоторой совокупности) может привести объект в неработоспособное или предельное состояние. В качестве основного показателя остаточного ресурса в результате прогноза должен определяться гамма-процентный ресурс, задаваемый двумя численными значениями: наработкой и выраженной в процентах

вероятностью того, что в течение этой наработки предельное состояние не будет достигнуто.

Для каждого из ответственных элементов оборудования разработаны свои критерии оценки состояния, обеспечивающие дальнейшую безопасную эксплуатацию. Однако их все можно свести к четырем требованиям:

- 1) заранее оговоренные недопустимые дефекты должны отсутствовать;
- 2) изменение микроструктуры металла не должно выходить за определенные границы;
- 3) остаточная деформация не должна превышать определенной величины;
- 4) толщина стенок элемента должна обеспечивать его целостность при ожидаемых рабочих напряжениях и температурах.

Для гибов паропроводов, работающих в условиях ползучести, установлены конкретные ограничения на возможность дальнейшей эксплуатации [2]:

1. Остаточная деформация ползучести не должна превышать: для прямых труб из стали 12Х1МФ – 1,5% диаметра; для прямых труб из сталей других марок – 1,0% диаметра; для прямых участков гнутых труб (гибов) независимо от марки стали – 0,8% диаметра. При этом остаточная деформация прямых труб и прямых участков гибов паропроводов блоков СКД из стали марок 12Х1МФ и 15Х1М1Ф не должна превышать 0,8 и 0,6% соответственно.

2. Для стали марок 12Х1МФ и 15Х1М1Ф суммарное предельное содержание легирующих элементов в карбидном осадке не должно превышать 60% от общего (суммарного) содержания легирующих элементов в металле.

3. Допускаются протяженные дефекты механического происхождения (риски) на наружной

поверхности гнутых элементов глубиной не более 10% номинальной толщины стенки, но не более 1,5 мм в растянутой зоне и не более 2,0 мм – на остальных участках поверхности.

4. На наружной поверхности паропроводов допускаются коррозионные язвы, раковины и другие локальные повреждения глубиной не более 10 % номинальной толщины стенки, но не более 2 мм. Трещины всех видов не допускаются.

5. Микроповрежденность металла при 500-кратном увеличении не должна превышать 4-го балла по шкале микроповрежденности [2].

6. Снижение плотности металла вблизи наружной поверхности, по сравнению с исходным состоянием, не должно превышать 0,3 %.

7. Степень сфероидизации перлита не должна превышать 4-й балл по шкале микроповрежденности [4].

8. Овальность гибов труб с отношением наружного к внутреннему диаметру менее 1,32 должна быть не менее 1,5 %. Снижение овальности в процессе эксплуатации не должно превышать 50 % от ее исходного состояния.

9. После 100 тыс. часов эксплуатации допускается снижение кратковременных механических свойств при комнатной температуре: временного сопротивления разрыву и предела текучести – на 30 МПа, ударной вязкости (KCU) – на 0,15 МДж/м<sup>2</sup> (1,5 кгс·м/см<sup>2</sup>), по сравнению с гарантированными уровнями среднемарочных значений соответствующих характеристик согласно требованиям на поставку. Минимальное значение ударной вязкости при комнатной температуре, полученное на образцах с острым надрезом (KCV), должно составлять не менее 0,25 МДж/м<sup>2</sup> (2,5 кгс·м/см<sup>2</sup>).

10. Предел текучести сталей 12X1МФ и 15X1М1Ф при температуре 550 °С должен быть не ниже 180 МПа, сталей 12МХ и 15ХМ при температуре 510 °С – не ниже 200 МПа.

11. Предел длительной прочности для конкретной марки стали на базе 10<sup>5</sup> и 2·10<sup>5</sup> ч не должен отклоняться более чем на 20 % в меньшую сторону по сравнению со средними значениями данной характеристики согласно требованиям технических условий.

12. Минимальный уровень длительной пластичности должен быть не ниже 5 % по результатам испытания образцов до разрушения на базе, условно соответствующей сроку эксплуатации паропровода.

Все эти ограничения должны выполняться и, если формально подходить к проведению прогноза, для каждого из них необходимо отслеживать динамику изменения. Однако анализ результатов диагностики состояния гибов Рязанской ГРЭС показал, что изменение большинства характеристик не является монотонным. Этот факт можно объяснить как сложностью протекающих процессов, так и погрешностью оценки этих параметров.

Достижение предельного состояния гiba связано с возникновением реальной возможности его разрушения. В условиях ползучести процесс пластического разрушения занимает достаточно большой период времени. В начальный момент при относительно малой деформации на шлифе металла под микроскопом наблюдаются отдельные зерна с четко выраженными границами. Затем границы расплываются, появляются отдельные поры. Далее количество пор увеличивается, они укрупняются, объединяются в цепочки. Цепочки переходят в микротрещины, микротрещины объединяются в множество макротрещин, и на последнем этапе

формируется одна макротрещина, по которой и происходит разрушение элемента.

Это качественное представление процесса разрушения положено в основу шкалы микроповреждаемости [4], в которой первому баллу соответствует отсутствие пор, второму баллу – наличие единичных пор, третьему баллу – множественные поры без определенной ориентации, четвертому – множественные поры с ориентацией по границам зерен, пятому – цепочки пор по границам зерен, шестому – слившиеся цепочки и микротрещины, не выявляемые при ультразвуковом контроле и седьмому – микротрещины и макротрещины, выявляемые при ультразвуковом контроле. Таким образом, оценивая состояние металла по шкале микроповреждаемости, можно предвидеть развитие процесса деградации металла на определенный промежуток времени.

Однако анализ микроструктуры металла трудоемок и проводится довольно редко и преимущественно после значительной продолжительности эксплуатации оборудования. Количество баллов невелико, тем более что не допускается эксплуатация гибов с появлением микротрещин, и реально можно наблюдать в работе только элементы, не превосходящие пятый класс микроповреждаемости. Кроме того, границы баллов достаточно расплывчаты, поэтому велика ошибка округления. По этой причине прогнозирование состояния оборудования только по данным микроструктурного анализа достаточно сложно.

В условиях ползучести процесс деградации структуры металла связан с пластической деформацией [5, 6]. Именно она является первопричиной появления микропор и микротрещин. Измерение остаточной деформации на прямых участках гибов не представляет сложности и проводится достаточно часто. Результаты измерений остаточной деформации образуют достаточную базу для проведения статистических исследований. Вместе с тем ограничения в 0,8% деформации для стали 12X1МФ и 0,6% для стали 151X1МФ не являются физически обоснованными, а лишь коррелируются с вероятностью разрушения трубопровода. Реальную опасность представляют дефекты микроструктуры, которые оцениваются по шкале микроповреждаемости [4], но вероятность появления опасных дефектов при одинаковых напряжениях определяется величиной накопленной деформации.

В связи с этим предлагается динамику процесса деградации структуры металла прогнозировать по величине остаточной деформации, а вероятность достижения предельного состояния в заданный период времени – по вероятности достижения максимально допустимой остаточной деформации (0,8 % для стали 12X1МФ и 0,6 % для стали 151X1МФ) и вероятности изменения микроструктуры до 6 баллов по шкале микроповреждаемости [4].

Следует отметить, что шкалы микроповрежденности [2] и микроповреждаемости [4] несколько отличаются друг от друга. Основное отличие состоит в том, что в шкале микроповрежденности [2] отсутствует балл 5 и запрет на эксплуатацию гибов с микроповрежденностью выше 4-х баллов равносильен запрету [1] эксплуатации гибов с микроповреждаемостью выше 5-ти баллов. В обоих случаях допускается работа гибов с микропорами

и цепочками микропор, но не допускается наличие микротрещин.

Несмотря на то, что процессы развития остаточной деформации и накопления микропор взаимосвязаны, полного соответствия по этим параметрам в результатах диагностики не наблюдается. Это связано со многими причинами. Деформация металла накапливается не только при стационарных режимах, но также и при пусках, остановах, изменениях нагрузки, когда температура металла не остается неизменной. Кроме того, измерения остаточной деформации и микроанализ структуры металла относятся к близким, но различным объектам: остаточная деформация измеряется на прямых участках, а анализ структуры проводится на растянутых участках гибов. Поэтому можно ожидать только вероятностной связи.

Деформация металла паропроводов происходит под воздействием напряжений, создаваемых внутренним давлением пара, весовыми нагрузками и неравномерностью температуры в стенке трубопровода при переходных процессах. Основную долю продолжительности эксплуатации составляют стационарные процессы, при которых нагрузки приблизительно одинаковы для всех однотипных элементов. Так как диагностика состояния металла проводится не ранее чем после 20–30 % выработки паркового ресурса, то можно принять, что процесс ползучести находится во второй стадии, когда скорость деформации зависит только от величины приложенной нагрузки. В этих условиях однотипные элементы одного энергоблока должны обладать одинаковой скоростью остаточной деформации.

Вместе с тем результаты диагностики показывают, что даже у полностью идентичных элементов, например, у одинаково расположенных гибов параллельных ниток одного энергоблока, значения остаточной деформации могут различаться в несколько раз. При этом за различные промежутки времени наблюдаемая скорость деформации одного и того же элемента может существенно меняться, не согласуясь с изменением скорости деформации аналогичного элемента. Такое протекание процесса можно объяснить только возникновением дополнительных напряжений, возникающих при изменении нагрузки энергоблока.

Статические напряжения достаточно стабильны, их значения приблизительно одинаковы для однотипных элементов различных объектов. Поэтому и долю накопленной деформации, вызванной этими напряжениями, можно считать детерминированной величиной, зависящей от уровня нагрузки и продолжительности работы элемента. Динамические напряжения более изменчивы и зависят от ряда факторов, учет которых сложен или вообще невозможен. Их вклад в развитие деформации носит принципиально индивидуальный характер, именно их влиянием объясняются различия в состоянии однотипных элементов, работающих одинаковое время приблизительно в одинаковых условиях.

По данным, полученным при диагностике состояния 280 гибов паропроводов острого пара и горячего промперегрева блоков 300 МВт №1 и №2 Рязанской ГРЭС за период их эксплуатации с 1973 по 2010 г., оказалось, что для некоторых гибов наблюдается временное улучшение их состояния: снижается остаточная деформация или балл микроповреждаемости, причем эти показатели между собой не коррелируют. Такая ситуация, противоречащая физической природе процесса, свидетельствует о наличии по-

грешностей в результатах измерений. По этой причине математическая модель процесса накопления деформации должна быть дополнена членом, учитывающим появление случайных погрешностей, распределенных по нормальному закону. Эту составляющую необходимо учитывать при идентификации параметров модели и моделировании наблюдаемых значений, но не принимать во внимание в прогнозе реального развития процесса.

В соответствии с этим, математическое описание процесса накопления деформации должно содержать детерминированную и стохастическую составляющие:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = f_1(N) + f_2(N). \quad (1)$$

Здесь  $f_1(N)$ ,  $f_2(N)$  – детерминированная и случайная функции, зависящие от эксплуатационной мощности энергоблока  $N$ . Конкретный вид функций и значения их параметров должны быть определены по результатам статистического анализа данных диагностики.

Далее было замечено, что скорость изменения состояния отдельных гибов может отличаться в несколько раз от аналогичной характеристики других элементов, при этом соответствующим образом изменяется и наблюдаемая скорость изменения баллов микроповреждаемости. Такое расхождение результатов уже нельзя объяснить только случайными погрешностями, и следует признать, что отдельные элементы воспринимают значительно большую нагрузку по сравнению с остальными. По формальным признакам невозможно установить причину перегруженности отдельных элементов, связанную, вероятнее всего, с состоянием и особенностями работы подвесной системы. Поэтому для конкретизации условий работы элементов целесообразно сначала разделить их на группы, различающиеся по конструктивным параметрам и марке металла. Далее внутри каждой группы следует выделить четыре подгруппы: первую подгруппу образуют элементы, имеющие низкие скорости деформации и рост микроповреждаемости; во вторую подгруппу включить элементы с высокой скоростью деформации и малой микроповреждаемостью; третью подгруппу создать из элементов с малой деформацией и высокой микроповреждаемостью; в четвертую подгруппу войдут элементы с высокими скоростями деформации и большой микроповреждаемостью. Вопрос о том, как конкретно распределять элементы по подгруппам, является открытым. Проще всего отнести к подгруппе с высокой скоростью деформации элементы, у которых наблюдаемая скорость деформации выше средней на данную наработку. Аналогичным способом можно поступить и при распределении элементов по микроповреждаемости структуры.

После кластеризации элементов для каждой подгруппы необходимо определить конкретный вид функций  $f_1(N)$  и  $f_2(N)$  в уравнении (1) и для прогнозируемого элемента провести статистическое моделирование процесса на заданный период будущей эксплуатации. Результаты моделирования определяют вероятность появления предельных значений остаточной деформации и вероятность достижения предельного класса микроповреждаемости.

Предлагаемый подход к прогнозированию состояния гибов является лишь общей схемой.

Для его практического применения необходимо создать базу данных о состоянии гивов, выявить вероятностную связь между величиной остаточной деформации и микрповреждаемостью структуры металла и разработать методику идентификации общего вида функций в уравнении (1) и их параметров.

#### Список литературы

1. **РД 10-577-03.** Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2004. – 127 с.

2. **СТО 17230287.27.100.005-2008.** Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль со-

стояния металла. Нормы и требования. – М.: ОАО «ЕЭС России», 2008. – 657 с.

3. **РД 09-102-95.** Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных Госгортехнадзору России.

4. **ОСТ 34-70-690-96.** Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации. – М.: ВТИ, 1997. – 44 с.

5. **Куманин В.И., Ковалева Л.А., Алексеев С.В.** Долговечность металла в условиях ползучести. – М.: Металлургия, 1988. – 224 с.

6. **Бугай Н.В., Березина Т.Г., Трунин И.И.** Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.

*Шувалов Сергей Ильич,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

*Митюшов Алексей Александрович,*

ОАО «ОГК-6»,  
генеральный директор,  
адрес: г. Москва, проспект Вернадского, д. 101/3,  
телефон (495) 428-53-01.