

Список литературы

1. Завгородний В.К. Механизация и автоматизация переработки пластических масс.-«Машиностроение», 1970. – 596 с.
2. Мак – Келви Е. Переработка полимеров.-М.: Мир, 1967. – 318 с.
3. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров.-М.: Химия, 1984.- 464 с.
4. Каминер А.А., Яхно О.М. Гидромеханика в инженерной практике. – К.: Техніка, 1987.- 175 с.
5. Каплун Я.Б., Ким В.С. Формующее оборудование экструдеров.- М.: Машиностроение, 1969.- 148с.
6. Яхно О.М., Носко С.В. Влияние условий входа на ламинарное течение аномально-вязкой жидкости в начальном участке канала. «Гидравлика и гидротехника», 1980, вып. 31, с.26-30.
7. Виноградов Г.В., Прозоровская Н.В. Исследование растворов полимеров с помощью капиллярных вискозиметров. // Пластические массы.-1964, №5-с.50-57.

УДК 539.432

А.С. Цыбенко¹ д-р техн.наук, Н.Г. Кришук¹ д-р техн.наук, И.П. Дуравкин² канд.техн.наук
1-НТУ Украины «Киевский политехнический институт», г.Киев, Украина
2-ООО «СГС Плюс» г.Севастополь, Украина

АЛГОРИТМ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПАРОПРОВОДОВ ТЭС ДЛЯ СВЕРХПАРКОВОГО ПЕРИОДА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Запропонована критеріальна методика і розроблений алгоритм розрахунково-експериментального індивідуального експертного обстеження з метою визначення залишкового ресурсу головних паропроводів (ГП) ТЕС з надпарковим терміном експлуатації. За критерії оцінки залишкового ресурсу прийнята допустиме напруження для жароміцних сталей із стабілізованими властивостями, граничні величини мікропошкодженості, а також граничні значення зернограничної деформації повзучості в елементах ГП.

A criterion method is offered and the algorithm of calculation-experimental individual expert inspection is developed with the purpose of determination of remaining resource of steam pipeline (SP) warmly the power station with the superpark term of exploitation. For the criteria of estimation of remaining resource accepted possible tension for heatproof staley with the stabilized properties, maximum sizes of damageability, and also maximum values of deformation of creep in the elements of SP.

Проблема надежной и безопасной эксплуатации ТЭС Украины осложняется невозможностью демонтажа и замены выработавших ресурс элементов главных паропроводов (ГП) в условиях дефицита резерва маневренной мощности, основу которой составляют ТЭС. Единственным практически реальным способом продления срока службы ГП является их ремонт и реконструкция на основе анализа фактических данных технической диагностики и экспертных заключений [1, 2].

Система технической диагностики определяется совокупностью различных методов и средств контроля котлотурбинного оборудования ТЭС на всех стадиях его изготовления и эксплуатации, а также наличием квалифицированных специалистов, имеющих соответствующую подготовку и осуществляющих диагностику по правилам, установленным соответствующей нормативно-технической документацией [3, 4].

Техническая диагностика в процессе эксплуатации ГП ТЭС осуществляется для проверки работоспособности, выявления дефектов, изменений технологических режимов и технического состояния, а также условий взаимодействия с окружающей средой. Такой контроль, помимо диагностических обследований с применением технических средств, может включать прогнозирование остаточного ресурса, оценку опасности (риска) дальнейшей эксплуатации, выводы о необходимости ремонта или реконструкции, определение срока, типа и объема ремонтных работ.

Анализ литературы [1-6] показывает, что прогнозирование остаточного ресурса ГП ТЭС со сроком эксплуатации, превышающим парковый, представляет собой многофакторную задачу определения предельно допустимого состояния их работоспособности [1]. В настоящее время не выработаны обоснованные критерии предельно допустимого состояния элементов ГП, находящихся в эксплуатации более 200 тысяч часов, а также методы прогнозирования остаточного ресурса с необходимой достоверностью [2].

Используемые на практике методы оценки работоспособности ГП для паркового периода эксплуатации включают [1-4]: нахождение номинальных напряжений от давления пара для текущих величин геометрических параметров конструктивных элементов ГП [7]; измерения давления и температуры перегретого пара, подаваемого на

вход паропровода; измерения и анализ деформации ползучести; определение и анализ структуры и микрповреждаемости металла на наружной поверхности элементов ГП; исследование характеристик жаропрочности образцов металла и его структуры после длительной эксплуатации в условиях высокотемпературной ползучести.

Методика экспертной оценки. Методика экспертной оценки остаточного ресурса ГП для сверхпаркового периода эксплуатации отличается от [2, 3] тем, что:

- для действующего паропровода разрабатывают адекватную имитационную модель, на основе которой определяют напряженно-деформированное состояние (НДС) ГП;
- по наружным бобышкам, приваренным на вертикальных и горизонтальных диаметрах труб ГП, с установленной периодичностью измеряют остаточную деформацию и находят скорость изменения зернограницной деформации ползучести металла для последовательности этапов термосилового нагружения;
- исследуют микроструктуру металла в реперных зонах наружной поверхности ГП методом С-реплик (модифицированная контрастная схема [2, 5]), а оценку предельных характеристик его повреждаемости выполняют на основе аналитической модели зарождения и роста пор при ползучести жаропрочных сталей в заданном диапазоне высоких температур для текущего времени эксплуатации;
- по полученным результатам оценивают работоспособность конструкции ГП и остаточный ресурс каждого его элемента из допустимых условий по предельным величинам напряжений, деформаций и характеристик повреждаемости состаренного в результате длительной эксплуатации металла.

Для экспертного заключения при анализе остаточного ресурса ГП проводится: – оценка цикличности и длительности нагрузок для стандартных и нестандартных условий функционирования ГП; – определение (по натурным вырезкам) механических свойств и характеристик высокотемпературной прочности металла ГП после длительной эксплуатации; – анализ геометрических несовершенств элементов ГП, приобретенных в процессе эксплуатации за счет коррозионно-эрозионного износа и деформационного искажения формы; – определение степени поврежденности и исследование дефектов металла эксплуатационного происхождения; – построение адекватной имитационной модели НДС и оценка прочности элементов ГП с текущими геометрическими характеристиками, фактическими термомеханическими свойствами стали (после длительной эксплуатации), установленными параметрами поврежденности материала;

– конкретизация предельных состояний для возможных видов отказов каждого элемента ГП с учетом условий его работы;

– оценка остаточного ресурса элементов ГП на основе предлагаемого алгоритма (рис.2) и формулировка экспертного заключения.

Дальнейшая эксплуатация ГП после проведения вышеуказанного комплекса мероприятий согласно предлагаемому алгоритму допускается при выполнении следующих условий нормативных документов (НД) [3, 4]: – отсутствия неустраняемых дефектов сплошности металла элементов ГП; – наличия пластических свойств металла (характеристики превышают минимально допустимые значения); – обеспечение необходимых запасов прочности, пластичности и ползучести; – ограничение величин эквивалентных напряжений для эксплуатационных условий термосилового нагружения; – не превышение допустимых величин деформаций и скоростей ползучести (по предыдущему циклу контроля); – соответствие допустимым параметрам микрповрежденности и сплошности, а также не достижение предельной твердости в зонах гибов, сварных швов и околошовных участках. Трещины любого вида на гйбах и в зонах сварных швов ГП не допускаются.

Имитационная модель НДС паропровода. Согласно НД [3, 4] и ТУ 108.031.08 (09,10) - 85. “Котлы стационарные и паропроводы пара и горячей воды. Нормы расчета на прочность” для расчета напряжений в элементах ГП от внутреннего давления дается простейшая аналитическая (котельная) формула, приближенно учитывающая изменение параметров геометрии сечения труб.

В предлагаемой имитационной модели НДС рекомендуется использование различных аппроксимационных схем и методов определения напряжений и деформаций элементов ГП при термосиловом нагружении в процессе эксплуатации на основе механики деформируемого твердого тела, стержневых систем, теории оболочек при соответствующем адекватном описании: геометрии, термомеханических свойств материала, нагрузок, кинематических ограничений и жесткостных связей [6, 7].

Стратегия построения имитационной модели предполагает декомпозицию сложной пространственной конструкции ГП на относительно простые элементы типовой формы с учетом особенностей рассматриваемого объекта. Геометрические характеристики типовых элементов ГП (прямые участки труб, гйбы, тройники, заглушки), соответствующих ГОСТу [8], корректируются по результатам текущих измерений толщин стенок (параметрам овализации круглого сечения). Схематизации подлежат все внутренние и внешние силовые факторы, различные типы кинематических опор и жесткостных связей (пружин), влияющие на напряженное и деформированное состояние ГП. Термомеханические свойства материала элементов модели ГП (модуль Юнга, коэффициент линейного термического напряжения, коэффициент Пуассона, параметрическая функция скорости деформаций ползучести) должны соответствовать результатам натурных испытаний конкретной марки стали после длительной эксплуатации.

Первый этап предполагает расчет упругого НДС модели ГП в виде пространственной системы сопряженных трубных элементов балочного типа под действием эксплуатационных (силовых, термических, гравитационных) нагрузок при заданной системе кинематических ограничений и жесткостных связей в опорах. Определению подлежат силовые реакции в опорах и усилия в пружинах, деформации в контролируемых узлах ГП, а также поля напряжений для всех элементов конструкции.

На втором этапе для уточнения величин экстремальных напряжений осуществляется расчет термонапряженного состояния плоского или объемного НДС наиболее нагруженных элементов ГП с учетом деформаций ползучести металла для стандартных и нестандартных условий термосилового нагружения.

Алгоритмы расчета НДС имитационной модели ГП реализованы в сертифицированных пакетах прикладных программ (ANSYS, PIPE-3D, АСТРА и других) ориентированных на метод конечных элементов [6, 8]. Для определения НДС можно использовать различные аппроксимации конструкции ГП. В частности, геометрическую аппроксимацию прямых участков труб, гибов, тройников, заглушек можно выполнить объемными конечными элементами (КЭ) или трубчатыми КЭ стержневого типа, а также суперэлементами [8-10].

Проверочный расчет на прочность и термокомпенсацию проводится на основе данных имитационной модели ГП по допускаемым напряжениям для холодного и горячего состояний в соответствии с требованиями ОСТ 108.031.08 (09,10) - 85. «Котлы стационарные и паропроводы пара и горячей воды. Нормы расчета на прочность» и Правилам Гостехнадзора [3, 4] для углеродистых сталей при температуре эксплуатации $> 673\text{K}$.

Критерием возможности дальнейшей эксплуатации элементов конструкции ГП на требуемый (заданный) период времени ($t_s = 25000, 50000 \text{ час}$) при расчетном значении эквивалентного напряжения σ_{np} и температуры металла T в соответствующей точке является выполнение условия прочности [9]

$$\sigma_{np} \leq [\sigma] = \min([\sigma]_t^T, [\sigma]_{0,2}^T, [\sigma]_{n1\%}^T), t \geq t_s \quad (1)$$

где $[\sigma]$ – допускаемые напряжения. Значения допускаемых напряжений $[\sigma]_t^T, [\sigma]_{0,2}^T, [\sigma]_{n1\%}^T$ при температуре T определяют по экспериментальным данным пределов: – длительной прочности $[\sigma]_t^T$ для времени t ; – текучести $[\sigma]_{0,2}^T$; – ползучести $[\sigma]_{n1\%}^T$ при соответствующих коэффициентах запаса k по длительной прочности и текучести равных $k = 1.5$ и ползучести $k = 1$.

Для сверпаркового периода эксплуатации ГП фактические значения величин пределов длительной прочности сталей 12X1M1Ф и 15X1M1Ф при различных температурах и времени испытаний τ приведены (таблицы и аналитические формулы) в работе [5].

Остаточная деформация ползучести. Периодические замеры остаточной деформации ползучести проводятся с момента начала эксплуатации ГП и имеют своей целью не пропустить момента достижения предельного по накопленной деформации состояния и более того, прогнозировать его. Построение и анализ эксплуатационных диаграмм деформаций ползучести дает возможность оценки остаточного ресурса длительно эксплуатирующихся ГП.

Исследования морфологии порообразования и разрушения металла элементов ГП в местах возможной концентрации напряжений при проскальзывании у карбидных включений на границах и в точках стыка трех зерен позволили разработать аналитическую модель зарождения и роста пор при ползучести энергомашиностроительных сталей [2, 5] в интервале эксплуатационных температур и напряжений. При длительной эксплуатации ГП в условиях повышенных температур возрастает доля деформации, локализованная в окрестностях границ зерен. За зернограничное проскальзывание в металле отвечает составляющая деформации ползучести, которая параллельна границе зерен. При проскальзывании по границам вследствие концентрации напряжений на карбидных частицах, возникают микрополости с критическим объемом пор. Диаметр критических пор в момент их слияния равен половине расстояния между потенциальными зародышами пор - частицами карбидов на границах зерен, имеющих характерный размер.

На основе разработанной аналитической модели зарождения и роста пор при ползучести сталей ГП в интервале эксплуатационных температур и напряжений уравнение долговечности $t_p \dot{\epsilon} \lambda \approx \epsilon_{sp} = C_i$ интерпретируется как условие постоянства зернограничной (а не общей) деформации [5], предшествующей разрушению материала за время t_p . Экспериментальные данные о зависимости отношения λ зернограничной деформации ϵ_{sp} к общей деформации ползучести $\epsilon_{общ}$ для альфа-железа удовлетворительно аппроксимируется выражением [5]

$$\dot{\lambda} = \epsilon_{sp} / \epsilon_{общ} \cong \exp(-\alpha\sigma), \alpha \cong 2 \times 10^{-8} \text{ Па}^{-1}. \quad (2)$$

При прогнозе остаточного ресурса ГП с учетом времени до разрушения металла t_p построение и анализ эксплуатационных диаграмм зернограничных деформаций ползучести

$$\epsilon_{sp} \cong \epsilon_{общ} \times \exp(-\alpha\sigma) = t_p \times \dot{\epsilon}_{общ} \times \exp(-\alpha\sigma) \quad (3)$$

дает возможность оценки допустимых величин деформаций $\epsilon_{общ}$ и скорости ползучести металла $\dot{\epsilon}_{общ}$ по предыдущему циклу контроля и по расчетным величинам номинальных напряжений σ .

Для оценки критического по деформации состояния

$$\epsilon_{sp} \cong const, \quad (4)$$

предшествующего разрушению Ст-Мо-V сталей, рекомендуется использовать величину

$$\epsilon_{кр}^{теор} = \frac{l_k}{2L_s} \exp(-\alpha\sigma) = 0.06 = 6\%, \quad (5)$$

где $l_k = 2$ мкм – размер поры, $L_s = 40$ мкм – расстояние между порами, $\sigma = 40$ МПа – среднее напряжение в паропроводе.

Величина накопленной деформации ползучести является одной из основных интегральных характеристик, определяющих остаточный ресурс работы элементов ГП. При достижении предельной деформации соответствующие элементы ГП подлежат замене. Согласно НД [3, 4] контроль деформации должен выполняться для прямых труб не более чем через 50 000 ч, а для прямых участков гибов, где контроль микроповрежденности отсутствует, не более чем через 25 000ч.

Для деформационной оценки остаточного ресурса с учетом регистрации технической информации о назначении ГП и его текущих технологических характеристиках (типоразмер труб, параметры транспортируемой среды, срок службы, количество пусков, эксплуатационные замеры вертикального и горизонтального диаметров труб по реперам, включая замеры в исходном, до эксплуатации, состоянии и др.) проводится: – анализ эксплуатационно-технических данных; – расчет величин относительной деформации в сечениях труб по двум взаимно-ортогональным направлениям (вертикальном и горизонтальном); – расчет и построение гистограмм деформации в характерных точках элементов ГП, достигнутой к моменту последнего замера; – построение графиков эксплуатационных кривых ползучести; – расчет скорости ползучести в рассматриваемых интервалах деформации; – экстраполяция кривых ползучести на предполагаемое время дальнейшей эксплуатации t_s , например, на 50 и 100 тыс. ч после последнего замера деформации; – расчет и построение гистограмм деформации, ожидаемой к моменту времени t ; – формирование базы данных деформации ползучести и ее скоростей для конструкции ГП.

Критерием возможности дальнейшей эксплуатации участка трубы (прямого или гiba) ГП при действующем напряжении является выполнение условия

$$\varepsilon(t) \leq [\varepsilon], \quad \dot{\varepsilon}(t) = d\varepsilon(t)/dt > 0, \quad (6)$$

где $\varepsilon(t)$, $\dot{\varepsilon}(t)$ – расчетные величины деформации и скорости зернограничной деформации ползучести металла для времени эксплуатации τ до наступления стадии неустановившейся ползучести металла; $[\varepsilon] = \varepsilon_{кр}$ – предельно допустимая величина деформации. Согласно ГКД (34.20.507-2003; 34.17.401-95) [3, 4] $\varepsilon_{кр}$ составляет соответственно 1,5% и 1% для прямых участков труб из сталей 12X1МФ и 15X1М1Ф. Независимо от марки стали для гибов ГП и прямых участков гнутых труб $\varepsilon_{кр} = 0.8\%$.

Поврежденность металла паропроводов. Накопление поврежденности металла ГП является прямым следствием деформации высокотемпературной ползучести. При прогнозировании остаточного ресурса элементов ГП важно как определение понятия поврежденности, так и выбор унифицированного метода её оценки. Понятие поврежденности металла ГП ограничено зарождением и ростом типичных для разрушения при ползучести пор и микротрещин размером, не превышающим размер зерен металла (< 1-2мкм).

Наиболее эффективным для исследования микроструктуры и поврежденности длительно эксплуатирующихся элементов ГП из сталей перлитного класса является усовершенствованный экспериментальный метод пластиковых реплик с использованием высокоразрешающей электронной микроскопии и его модификация: – трансмиссионная электронная микроскопия вторичных угольных реплик (С-реплик) реализованных последовательным нанесением слоев $NaCl$ и угольной пыли [5]. Материал реплики обладает высокой разрешающей способностью (не ниже ~100 нанометров), отсутствием собственной структуры, выявляемой при оптических увеличениях, низкой адгезией к стали, стабильностью в течение достаточно длительного времени. Выступ на полистироловой реплике соответствует впадине (поре) на металлографическом шлифе.

Установлены качественные и количественные характеристики статистической достоверности методов исследования поврежденности металла: – выявленные единичные зернограничные поры отвечают стадии установившейся ползучести при деформации, превышающей 0,4...0,6%; – выявленные цепочки пор по границам зерен размером ~0,3-1,0 мкм свидетельствуют о начале стадии ускоренной ползучести.

При обнаружении в гibaх ГП микроповрежденности металла выше третьего балла по НД [3, 4] (единичные поры размером больше 0,2 мкм или совокупность пор с диаметром превышающим половину расстояния между зонами их скопления в соответствии с аналитической моделью зарождения и роста пор при ползучести сталей) дальнейшее их использование при ограничении срока эксплуатации допускается при согласовании со специализированной организацией, имеющей разрешение Госнадзорхрантруда.

Алгоритм определения работоспособности паропровода. Оценка остаточного ресурса основана на применении критериальной методики в программе индивидуального экспертного обследования длительно эксплуатирующихся ГП согласно предлагаемому алгоритму.

В качестве основного (первого) критерия принято условие прочности (1), которое ограничивает остаточный ресурс по значению приведенного напряжения в элементе конструкции ГП в сравнении с допускаемыми величинами напряжений длительной прочности, пластичности и ползучести. Величину t_s в (2) следует рассматривать как расчетный прогнозируемый ресурс данного элемента ГП [1-5], являющийся временным ориентиром, в течение которого следует выполнить те либо иные операции технической диагностики, в частности, анализ деформации и степени поврежденности металла [3, 4].

Проверочный расчет на прочность согласно первому критерию и термокомпенсацию (оценка деформированного состояния ГП в холодном и горячем состояниях) проводится с использованием принятой адекватной имитационной модели ГП.

Если в результате расчетного исследования согласно (1) установлено, что для рассматриваемого элемента ГП $t < t_s$, то для этого элемента проводится определение остаточной деформации $\varepsilon_{ост} = \varepsilon(t)$, а также исследование

микроповрежденности металла. На основании результатов анализа принимается решение: 1) о демонтаже и замене элемента ГП ($\varepsilon_{ост} \geq \varepsilon_{кр}$ при наличии цепочек пор); 2) дополнительном лабораторном исследовании металла ($0.5\varepsilon_{кр} \leq \varepsilon_{ост} \leq \varepsilon_{кр}$ при наличии одиночных пор) с возможной последующей дефектацией или оценкой работоспособности элемента ГП (как правило, включающей в себя дополнительные испытания на длительную прочность); 3) продолжения эксплуатации ($\varepsilon_{ост} \geq \varepsilon_{кр}$ при отсутствии пор) в течение t_3 .

При установленном $t > t_3$ элемент ГП допускается специализированной организацией к дальнейшей эксплуатации на время t_3 , по истечению которого вновь выполняется анализ деформации и микроповрежденности металла в соответствии с предлагаемой методикой. В случае $t > t_3$, время дальнейшей эксплуатации каждого элемента ГП назначается индивидуально с учетом данных анализа микроповрежденности металла.

Элементы ГП, имеющие дефекты металла (цепочки пор) или пороговые значения микроповрежденности (выше третьего бала по НД), подлежат замене.

Предложенный алгоритм экспертной оценки остаточного ресурса ГП применялся на практике для ряда ТЭС Украины. В частности он использовался для оценки остаточного ресурса паропровода острого пара блока 200МВт Кураховской ТЭС, введенного в эксплуатацию в 1968 году. Паропровод изготовлен из труб $d345 \times 23$ мм и к моменту начала обследования отработал 195 000 часов при температуре $T=818\text{K}$ и давлении среды $P=14.0\text{МПа}$. На основе данных экспертной оценки проведена рациональная реконструкция ГП ТЭС с последующим введением его в эксплуатацию.

Список литературы

1. Кривенюк В.В., Добровольский В.Е., Мухопад Г.В., Ткачев В.И., Дуравкин И.П., Солдатов С.С. Об оценке ресурса длительно работающего оборудования ТЭС // Энергетика и электрификация. - 2003. - № 3.-С. 22-25.
2. Добровольский В.Е., Дуравкин И.П., Солдатов С.С. Методы исследования поврежденности металла энергооборудования // Тезисы докладов 4-ой национальной конференции "Неруйнівний контроль та технічна діагностика", НКТД - 2003. - Киев: УТНКТД, 2003. – с.86 - 87.
3. ГКД 34.17.401. Контроль та продовження строку служби металу устаткування теплових електростанцій. Типова інструкція. Частина 1. Котли, турбіни та трубопроводи з тиском 9 МПа і вище.
4. СОУ-Н МПЕ 40. 1.17. 401. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція: Затв. Мінтопэнерго України 16. 12. 2004: Надано чинності 21. 06. 2005: Строк перевірення 2010 рік.-Київ., 2005. -75с.
5. Дуравкін І.П. Прогнозування понадпаркового залишкового ресурсу головних паропроводів ТЕС: Автореф. дис...канд.техн.наук: 01.02.04 / НТУУ «КПІ». - К., 2009. -20 с.
6. Цыбенко А.С., Кришук Н.Г., Дуравкин И.П., Злаказов С.А. Оценка долговечности длительно эксплуатирующихся энергомашиностроительных конструкций на основе напряженно-деформированного состояния // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. Академіка В.Лазаряна.– 2006.–№13.– с.165-167
7. ОСТ 108.030129-79. Фасонные детали и сборочные единицы станционных и турбинных трубопроводов ТЭС. Общие технические условия.
8. Орьяк И.В., Тороп В.П., Ромашенко В.А., Жураховский С.В. Расчет пространственного разветвленного трубопровода в программном комплексе оценки прочности оборудования АЭС. - 1998, №2, с. 87-100
9. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов.– 2-е изд. – М.: Энергия, 1980.– 424с
10. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.–428с.