

Экспертная оценка влияния изменения параметров острого пара на долговечность элементов основного энергооборудования, работающего в условиях ползучести

А.Н. Кудряшов^а, И.И. Айзенберг^б, Н.Е. Буйнов^с, С.Н. Сушко^д

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^аkan@istu.irk.ru, ^бeizenberg@mail.ru, ^сbujnov@istu.irk.ru, ^дsvetas@istu.irk.ru

Статья поступила 18.02.2017, принята 23.03.2017

Техническое состояние и долговечность элементов основного оборудования тепловых электрических станций (ТЭС) во многом определяются параметрами рабочего тела при стационарной работе. Изменение данных параметров приводит к изменению характеристик долговечности элементов, работающих в условиях ползучести. В статье рассматривается проблема оценки индивидуального остаточного ресурса ряда элементов основного оборудования ТЭС в зависимости от предполагаемых параметров рабочего тела. Рассматриваются элементы, работающие в условиях ползучести и (или) упругопластического деформирования при стационарных и переменных режимах работы оборудования. На основе приведенного анализа методов расчета остаточного ресурса предлагается методика определения такого ресурса на основе экспертной оценки вероятностей накопления повреждений и изменения прочностных свойств материала при длительной эксплуатации. Предлагаемая методика определения остаточного ресурса позволяет проводить экспертную оценку при незначительных объемах информации о режимах эксплуатации и состоянии металла на момент выработки паркового и индивидуального ресурса.

Ключевые слова: долговечность; ползучесть; металлы; давление; температура; напряжение; ресурс; поврежденность; разрушение.

Expert assessment of the impact of changes in steam parameters on the durability of the main elements of power equipment, operating under creep conditions

A.N. Kudryashov^а, I.I. Aizenberg^б, N.E. Bujnov^с, S.N. Sushko^д

Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^аkan@istu.irk.ru, ^бeizenberg@mail.ru, ^сbujnov@istu.irk.ru, ^дsvetas@istu.irk.ru

Received 18.02.2017, accepted 23.03.2017

The technical condition and longevity of the elements of the main equipment of thermal power plants (TPPs) are largely determined by the parameters of the working fluid during stationary operation. The change in these parameters leads to a change in the characteristics of the longevity of elements operating under creep conditions. The article discusses the problem of assessing the residual life of a number of individual elements of the thermal power plant main equipment, depending on the estimated parameters of the working fluid. The article considers the elements operating under creep and (or) elastoplastic deformation at steady-state and variable load operation. Based on the presented analysis of the residual life calculation methods, a method is proposed for determining the residual life on the basis of peer review of the damage accumulation probability and changes in the strength properties of the material during long-term operation. The proposed method of determining the residual life allows for peer review provided little information on the operation modes and material conditions at the moment of fleet life exhaustion and individual element service life exhaustion.

Keywords: durability; creep; metal; pressure; temperature; stress; service life; damage; destruction.

Введение

Техническое состояние и долговечность элементов основного оборудования ТЭС во многом определяются параметрами рабочего тела при стационарной работе — температурой и давлением. Изменение данных параметров приводит к изменению характеристик долговечности элементов, работающих в условиях ползучести. Значительное влияние на долговечность оказывает скорость изменения рабочих параметров. К таковым относятся ступени пароперегревателя, стационарные

паропроводы острого пара, корпуса стопорных и регулирующих клапанов, корпуса цилиндров высокого давления, а также часть ротора высокого давления.

Ускоренное (замедленное) истощение ресурса работоспособности элемента приведет к более ранней (поздней) необходимости его диагностики и замены.

Теоретическая часть. Основным фактором является температура острого пара. Известно, что изменение температуры на 15–20 °С изменяет долговечность металла, работающего в условиях ползучести, почти в 2

раза [1–5]. Долговечность элементов конструкций можно описать рядом показателей: различного вида ресурсы, накопленная поврежденность, число пусков и т. д., в зависимости от характера нагружения.

Из показателей долговечности необходимо выбрать такой, с помощью которого можно будет наиболее объективно оценить влияние изменения параметров остро пара на долговечность на основе имеющейся эксплуатационной, проектной и ремонтной информации расчетным путем.

В первую очередь к показателям долговечности относится технический ресурс — случайная величина наработки элемента энергооборудования от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до наступления предельного состояния [5; 6]. Под предельным понимается техническое состояние элемента, когда его дальнейшая эксплуатация недопустима по соображениям безопасности или экономической нецелесообразности ремонта. В качестве элементов рассматриваются корпуса, прямые трубы, гибы, сварные стыки и т. п.

В соответствии с видом элемента в нормативной литературе приводятся критерии предельных состояний, например, предельная деформация ползучести, глубина коррозионных повреждений, остаточная толщина стенки и т. п. Ряд критериев определяется характеристиками микроструктуры металла элементов.

Изменение технического состояния элемента происходит под действием эксплуатационных нагрузок: силовых, температурных, различных воздействий (коррозионных, эрозионных). В целом величина технического ресурса элемента зависит от конкретных рабочих напряжений в этом элементе при рабочей температуре на стационарных режимах работы или от размаха напряжений и температур на переменных режимах, а также от интенсивности процессов коррозии и эрозии.

С другой стороны, ресурс определяется характеристиками несущей способности материала элемента, а также распределением по телу элемента различного рода дефектов производства — металлургических, технологических и т. п. Последнее имеет особое значение для литых деталей [8–10].

Учитывая, что несущая способность металла имеет существенное рассеяние, начальное распределение дефектов неизвестно, реальные нагрузки и температуры имеют случайную составляющую, технический ресурс элементов — величина случайная. Расчетный и парковый ресурсы регламентируются для массовых изделий при среднестатистических условиях эксплуатации, поэтому расчетное определение технического ресурса отдельной детали на этапе проектирования не имеет смысла.

Эксплуатационный персонал интересуется, как правило, не полный технический ресурс элемента, а индивидуальный остаточный ресурс той или иной детали или узла. В соответствии с нормативной [11; 12] и научной [8–10; 13–15] литературой его можно оценить с помощью методов исследования металла элемента (методами разрушающей и неразрушающей дефектоскопии, контроля структуры металла, химического анализа и т. д.), геометрических измерений и т. п. Для каждого элемента эта процедура весьма длительная, дорогостоящая

и может выполняться лишь специализированной организацией.

К следующей базовой характеристике долговечности относится парковый ресурс. Согласно [7; 8], парковый ресурс — наработка однотипных по конструкции, маркам стали и условиям эксплуатации элементов теплоэнергетического оборудования, которая обеспечивает их безаварийную работу при соблюдении требований действующей нормативно-технической документации. Парковый ресурс оценивается по номинальному типоразмеру трубы и по установленной температуре эксплуатации. При этом не предусматривается корректировка значения паркового ресурса в зависимости от реальной толщины стенки и температуры. Согласно [12], значения паркового ресурса для труб разных типоразмеров и различных параметров были получены механически — это точка пересечения линии приведенного напряжения с нижней границей полосы разброса значений длительной прочности для конкретной температуры. В работах [10–14] предлагается определять приведенный парковый ресурс, в какой-то степени учитывающий реальную начальную толщину стенки и температуру эксплуатации. Однако сомнительно, что даже по приведенному парковому ресурсу можно судить о реальном техническом ресурсе отдельного элемента.

К настоящему времени значительная часть основного оборудования выработала расчетный и парковый ресурсы (до 50–60 %), возможно, поэтому понятие паркового ресурса в последних нормативных документах по определению остаточного ресурса не рассматривается, а индивидуальный и остаточный ресурсы определяются практически, по исчерпанию паркового ресурса. Считаем, что понятие паркового ресурса следует оставить для элементов, работающих в условиях снятия слоя упругопластического деформирования. По достижению паркового ресурса проводится вышеуказанное обследование металла и работы элемента, устанавливается индивидуальный ресурс — назначенный ресурс конкретного объекта, определенный с учетом фактических свойств металла и условий эксплуатации. Проведение ряда мероприятий по восстановлению работоспособности (например, поврежденного металла) или термообработка позволяют продлить срок службы оборудования, назначив индивидуальный ресурс. По исчерпанию индивидуального ресурса возможно его продление на основе обследования состояния оборудования, определения остаточного ресурса и выполнения необходимых мероприятий.

На рис. 1 приведена последовательность работ по продлению срока службы теплосилового оборудования [12].

Индивидуальный ресурс в большей степени, чем другие рассмотренные показатели долговечности, соответствует понятию технического ресурса с некоторым запасом прочности. Согласно [3; 10–12], этот запас составляет от 1,15 для высоконагруженных гибов паропровода до 1,5 и выше — для корпусных деталей.

Однако для определения индивидуального ресурса элементов ТЭС, работающих в условиях ползучести, требуется масштабная работа службы металлов и большее число расчетов по определению эквивалентных напряжений в элементах.

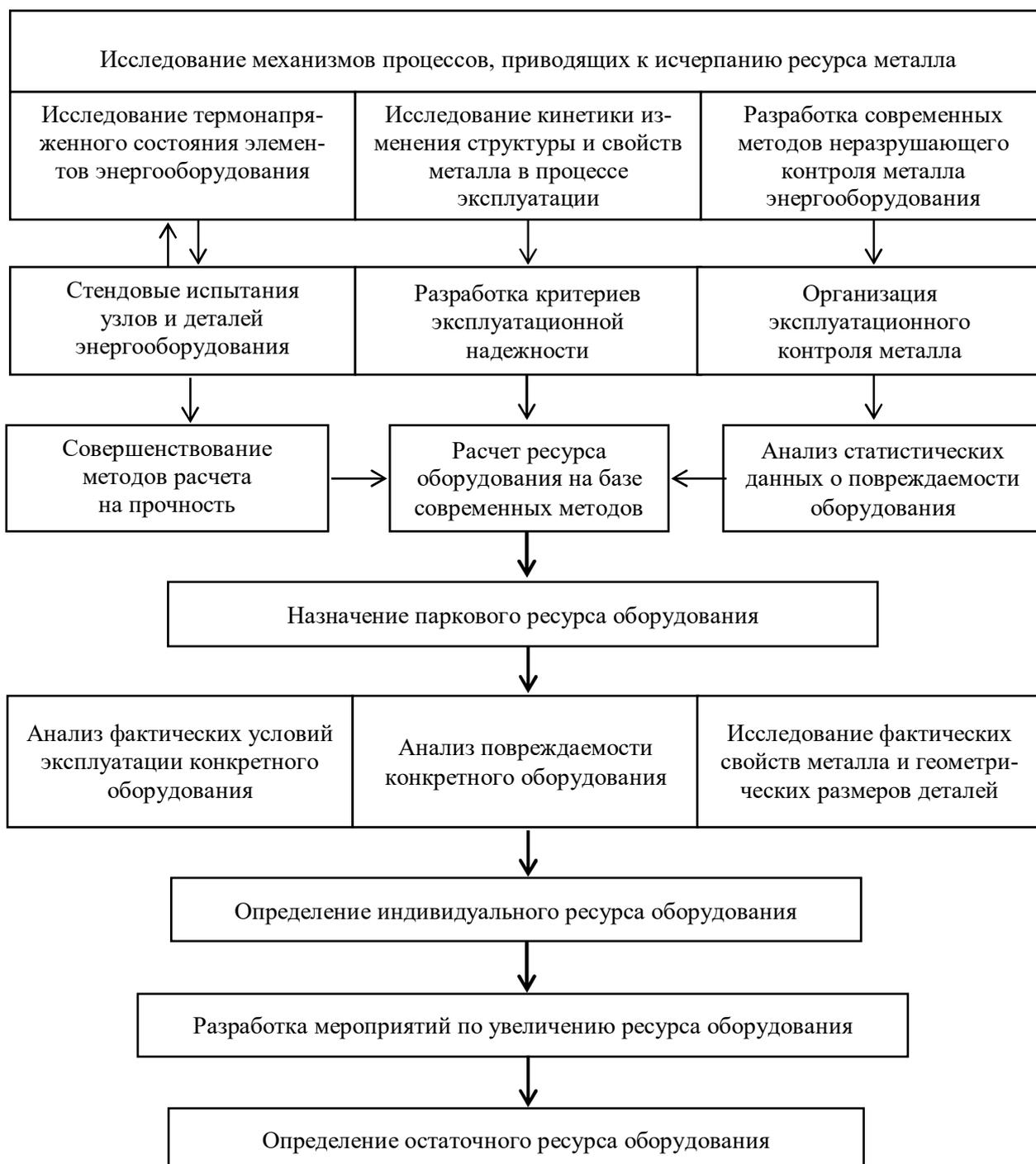


Рис. 1. Продление ресурса теплосилового оборудования ТЭС

Учитывая количество элементов, на это уйдет несколько лет, и потребуются большие материальные затраты. Поэтому единственным показателем из рассмотренных, которым можно пользоваться при оценке влияния изменения параметров острого пара, является техническое состояние элемента на момент истощения паркового ресурса [16].

Техническое состояние любого работающего элемента оборудования можно оценить по накопленной в его материале поврежденности. С физической точки зрения, поврежденность проявляется в виде разрушений на микро- и макроструктуре металла. В частности, в зависимости от условий работы деталей при ползуче-

сти в теплоустойчивой стали различают три вида разрушений [8, 10–12]:

- вязкое разрушение;
- образование и рост клиновидных трещин;
- разрушение порообразованием.

Вязкое разрушение часто встречается при повышении температуры при работе труб поверхности нагрева в условиях ползучести (при высоких уровнях нагрузки). Разрушение носит внутризёрный характер.

Разрушение путем образования клиновидных трещин развивается либо в зонах концентрации напряжений, либо связано с охрупчиванием металла при невысоких нагрузках и носит межзёрный характер.

Образование пор по границам зёрен происходит при пониженных напряжениях в условиях длительной эксплуатации. В настоящее время активно используется нормативная методика оценки остаточного ресурса элементов по наличию пор или цепочек пор в микроструктуре металла элемента.

Математическими моделями физического процесса накопления поврежденности металла элементов оборудования являются теории накопления повреждений. Имеется линейная теория накопления повреждений и большое число нелинейных теорий, требующих на порядок больший объем информации для реализации. Поэтому чаще всего используют линейную теорию накопления напряжений.

Согласно линейной теории, поврежденность металла является неубывающей функцией времени эксплуатации элемента, изменяясь от $D_{нач} = 0$ начальной величины до предельной величины $D_{пр} = 1$. Величина $D_{нач}$ соответствует вводу элемента в эксплуатацию, $D_{пр}$ — предельному состоянию элемента. Вторым условием линейной модели суммирования повреждений является то, что характер повреждений от любых видов нагрузки (стационарная нагрузка элемента в условиях ползучести, упругопластическое деформирование в пуско-остановочных режимах, напряжения от температурных перемещений и т. д.) считается одинаковым, поэтому их можно суммировать линейно.

В качестве примера рассмотрим применение линейной теории суммирования повреждений для материала корпуса стопорного клапана. Металл корпуса клапана испытывает ползучесть под действием эквивалентных напряжений. При расчете этих напряжений можно учесть истончение стенок из-за коррозии и эрозии, а также концентрацию напряжений. При расчетной температуре эксплуатации по кривой длительной прочности определяется время до разрушения по критерию длительной прочности для соответствующего эквивалентного напряжения τ_{pi} , и тогда накопленное повреждение за определенную наработку на i -м стационарном режиме τ_i :

$$D_{цикл} = \tau_i / \tau_{pi}.$$

Так как корпус является толстостенной деталью, подверженной малоцикловой усталости при пуско-остановочных режимах, то поврежденность при переменных режимах можно определить отношением числа циклов определенного j -го вида (например, пуск из холодного состояния — останов свыше 72 ч) N_j к числу циклов такого вида до разрушения, определенному по размаху деформации в цикле (полной или пластической) N_{pj} по известным расчетным зависимостям, в частности по формуле Мэнсона [1–4]:

$$D_{цикл} = N_j / N_{pj}.$$

Если отслеживать режимы эксплуатации с самого ее начала, иметь двухмерную, а лучше трехмерную модель расчета напряженно-деформированного состояния, то, ежегодно подсчитывая накопленную за предыдущий год поврежденность, можно расчетным путем определить остаточный ресурс элемента.

Для реализации этого подхода также требуется весьма обширный объем информации по эксплуатационным режимам с начала эксплуатации, толщине стенок и геометрии элементов, регистрация скоростей набора температуры во время пуска и т. д., а также большой объем расчетной работы. Кроме того, накопленная поврежденность — случайная величина, зависящая от рассеяния характеристик несущей способности металла элемента и от разброса нагрузок. Расчет параметров рассеяния накопленной поврежденности также требует дополнительных усилий и информации.

Еще одним способом оценки влияния параметров острого пара на долговечность могла бы стать информация об отказах на том или ином наборе параметров пара. Однако теплоэнергетическое оборудование отказывает весьма редко, а каждый элемент имеет индивидуальное сочетание несущей способности и нагрузок в процессе эксплуатации. Поэтому доказать конкретную роль того или иного набора параметров практически невозможно.

Итак, на основе анализа методов расчета показателей долговечности видно, что ни один из них не может быть использован напрямую для учета влияния изменения параметров свежего пара на долговечность элементов теплосилового оборудования. Поэтому необходимо использовать метод экспертной оценки, адекватный имеющейся информации и позволяющий определить экономический эффект от относительного увеличения (уменьшения) долговечности оборудования при изменении параметров острого пара.

В рамках работы по обоснованию выбора начальных параметров острого пара разработана методика экспертной оценки влияния их изменения на долговечность элементов основного энергооборудования, работающего в условиях ползучести [17].

Методика экспертной оценки базируется на следующих предположениях:

- при изменении параметров острого пара рассматривается только один вид разрушения — ползучесть (при увеличении температуры и величины эквивалентного напряжения скорость ползучести возрастает, при уменьшении — падает). При этом основную роль играет температура острого пара;

- считается, что в период эксплуатации до достижения паркового ресурса вероятность отказа элементов оборудования — равной нулю;

- исчерпание долговечности происходит из-за накопления повреждений (используется линейная теория суммирования повреждений). Предельное состояние элемента отвечает накопленному повреждению $D_{пр} = 1$;

- принимается, что накопленное повреждение имеет разброс, вызванный рассеянием несущей способности материала конструкции и изменениями эквивалентного напряженно-деформированного состояния. Принимается нормальный закон распределения накопленного повреждения. Ширина полосы рассеяния составляет 6σ , где σ — среднеквадратическое отклонение величины D от $D_{пр}$, которое для нормального закона распределения делит площадь под кривой распределения пополам;

– принимается, что полоса рассеяния накопленной поврежденности литого металла существенно (в 2–2,5 раза) шире, чем у деформированного. Связано это с более высоким числом технологических дефектов в литых элементах по сравнению с элементами, изготовленными методами пластического деформирования, и несовершенством технологии литья.

Графическое изображение процесса накопления повреждений приведено на рис. 2.

Принимается, что ширина полосы рассеяния не зависит от наработки. Отметим, что согласно одним исследованиям, ширина полосы рассеяния растет с наработкой из-за изменчивости нагрузки, неравномерности коррозионного процесса и т. д.

Другой подход предполагает сужение полосы рассеяния накопленного повреждения с наработкой из-за выявления и устранения во время ремонтов технологических дефектов материала элементов.

Угол α на рис. 2 соответствует скорости накопления повреждений из-за ползучести материала элемента при определенной температуре эксплуатации (например, 555 °С). Если температура будет выше, угол α будет больше, для меньших температур металла — меньше. При этом принимается, что ширина полосы рассеяния не изменится. Таким образом, можно построить вспомогательный график зависимости скорости накопления повреждений (угла α) от рабочей температуры металла элемента (рис. 3).

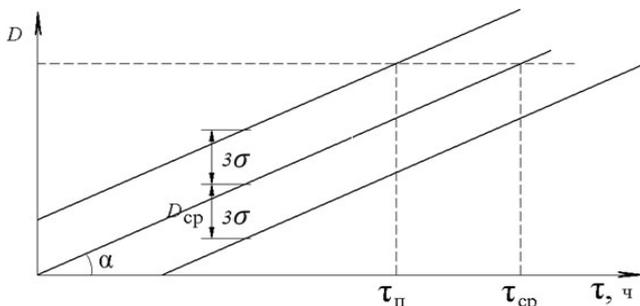


Рис. 2. Процесс накопления повреждений: τ_n — парковый ресурс элемента; $\tau_{ср}$ — средний ресурс элемента (вероятность отказа 50 %)

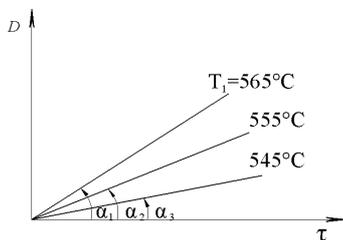


Рис. 3. Процесс накопления повреждений в зависимости от температуры среды

Тогда накопление повреждений в течение эксплуатации, когда производилось изменение параметров острого пара, будет выглядеть так, как представлено на рис. 4. Элементы с начала эксплуатации работали на проектных параметрах острого пара (скорость накопления повреждений $V_{D2} = \text{tg } \alpha_2$), затем, после наработки τ_1 , был осуществлен переход на пониженные пара-

метры ($V_{D3} = \text{tg } \alpha_3$), при τ_2 вернулись на проектные параметры, а при τ_3 перешли на повышенные параметры ($V_{D1} = \text{tg } \alpha_1$). Согласно принятым допущениям, вследствие такой эксплуатации считается, что до наработки $\tau_n^{\text{изм}}$ вероятность отказа равна нулю, т. е. $Q = 0$.

После построения графика накопления повреждений с учетом изменения параметров острого пара определяется вероятность безотказной работы P . При наработке $\tau > \tau_n^{\text{изм}}$ вероятность отказа Q соответствует площади под кривой распределения, отсекаемой накопленным повреждением $D_{\text{нр}} = 1$ (рис. 5).

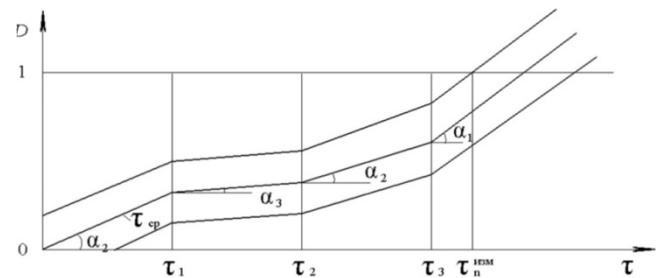


Рис. 4. Процесс накопления повреждений в течение эксплуатации

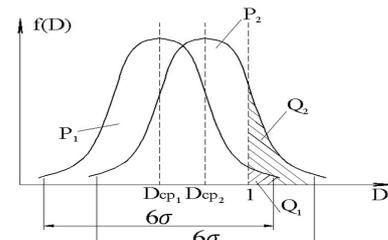


Рис. 5. Плотность распределения накопленного повреждения металла элемента при наработках $\tau > \tau_n^{\text{изм}}$

С ростом срока эксплуатации накопленное повреждение растет ($Q_2 > Q_1$), а вероятность безотказной работы снижается ($P_2 < P_1$).

Тогда можно регламентировать минимальную вероятность безотказной работы P_{min} и, следовательно, наработку.

Соответственно, смещается и величина среднего накопленного повреждения $D_{ср2} > D_{ср1}$.

Учитывая, что закон распределения накопленного повреждения принят нормальным, а ширина полосы распределения остается неизменной ($\sigma = \text{const}$), σ — среднеквадратическое отклонение накопления повреждения, вероятность безотказной работы определится из зависимости [13–15]:

$$P = \int_0^1 f(D)dD \quad \text{или} \quad P = 1 - \Phi[(D - D_{ср})/\sigma],$$

где $\Phi[(D - D_{ср})/\sigma]$ — нормированная функция нормального распределения.

Подход при определении долговечности элементов, изготовленных методом литья и методами пластического деформирования, одинаков, отличаются лишь полосы рассеяния. На рис. 6 представлены плотности распределения накопленного повреждения металла элемента, изготовленного различными методами.

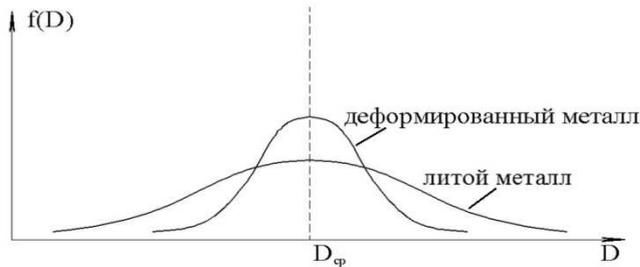


Рис. 6. Плотность распределения накопленного повреждения металла элемента, изготовленного различными методами

Заключение

Полученная оценка вероятности безотказной работы элементов оборудования, работающего в условиях ползучести, является экспертной, она пригодна лишь для оценки влияния изменения начальных параметров острого пара и не претендует на объективную меру надежности рассматриваемых деталей

Литература

1. Бугай Н.В., Березина Т.Г., Трунин И.И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1994. 272 с.
2. Балина В.С., Ланин А.А. Прочность и долговечность конструкций при ползучести. СПб.: Политехника, 1996. 182 с.
3. Островейковский В.А., Сальников Н.Л. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.
4. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. -2-е изд. М.: Энергия, 1980. 424 с.
5. Ланская К.А. Жаропрочные стали. М.: Metallurgiya, 1969. 247 с.
6. Ресурс и надежность материалов и сварных соединений энергетических установок / под ред. Ю.К. Петрени, А.И. Рыбникова, А.А. Ланина. СПб.: Изд-во ОАО "НПО ЦКТИ", 2002. Вып. 286. 186 с.
7. Должанский П.Р. Особенности оценки остаточного ресурса паропроводных труб при эксплуатации сверх паркового ресурса // Теплоэнергетика. 2005. № 8. С. 35-39.
8. Гофман Ю.Н. Оценка работоспособности металла энергооборудования ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1990. 136 с.
9. Резинских Р.Ф., Гринь Е.А., Злепко В.Ф. Концепция продления ресурса металла оборудования ТЭС // Промышленная теплоэнергетика. 2004. № 4. С. 25-29.
10. Кудряшов А.Н., Айзенберг И.И., Буйнов Н.Е., Сушко С.Н. Оценка перехода ТЭС на проектные начальные параметры пара // Материалы II науч.-практической конф. с междунар. участием «Инновационная энергетика 2010». Новосибирск, 2010. С. 24-26.
11. Паули В.К. К оценке надежности работы энергетического оборудования // Теплоэнергетика. 1996. № 12. С. 37-41.

12. Тумановский А.Г., Резинских Р.Ф. Стратегия продления ресурса и технического перевооружения тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2001. № 6. С. 3-10.

13. Резинских Р.Ф. Еще раз о ресурсе энергооборудования // Надежность и безопасность энергетики. 2009. № 4. С. 9-11.

14. Айзенберг И.И., Буйнов Н.Е., Кудряшов А.Н. Методика экспертной оценки влияния изменения параметров острого пара на долговечность элементов основного оборудования энергоустановок // Материалы Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». Иркутск, 2007. С. 119-124.

References

1. Bugai N.V., Berezina T.G., Trunin I.I. The efficiency and durability of the power equipment of metal. M.: Energoatomizdat, 1994. 272 p.
2. Balina V.S., Lanin A.A. The strength and durability of structures in creep. SPb.: Politehnika, 1996. 182 p.
3. Ostroveikovskii V.A., Sal'nikov N.L. Probabilistic forecast performance elements NPP. M.: Energoatomizdat, 1990. 416 p.
4. Antikain P.A. Metals and strength calculation of boilers and pipelines. 2-e izd. M.: Energiya, 1980. 424 p.
5. Lanskaya K.A. Heat-resistant steel. M.: Metallurgiya, 1969. 247 p.
6. Resource and reliability of materials and welded soedineniyenergeticheskikh plants / pod red. Yu.K. Petreni, A.I. Rybnikova, A.A. Lanina. SPb.: Izd-vo OAO "NPO TsKTI", 2002. Vyp. 286. 186 p.
7. Dolzhanskii P.R. Features of residual life assessment conductivity of steam pipes in operation in excess of park resources // Thermal Engineering. 2005. № 8. P. 35-39.
8. Gofman Yu.N. Evaluation of efficiency of power metal TPP. M.: Energoatomizdat, 1990. 136 p.
9. Rezinskikh R.F., Grin' E.A., Zlepko V.F. Concept extending resource the metal equipment TPP // Promyshlennaya teploenergetika. 2004. № 4. P. 25-29.
10. Kudryashov A.N., Aizenberg I.I., Buinov N.E., Sushko S.N. Evaluation of the transition TPP to design the initial parameters of steam // Materialy II nauch.-prakticheskoiy konf. s mezhdu-nar. uchastiem «Innovatsionnaya energetika 2010». Novosibirsk, 2010. P. 24-26.
11. Pauli V.K. By assessing the reliability of the power equipment // Thermal Engineering. 1996. № 12. P. 37-41.
12. Tumanovskii A.G., Rezinskikh R.F. Strategy for life extension and modernization of thermal power // Thermal Engineering. 2001. № 6. P. 3-10.
13. Rezinskikh R.F. Once again on the resource of power // Safety & Reliability of Power Industry. 2009. № 4. P. 9-11.
14. Aizenberg I.I., Buinov N.E., Kudryashov A.N. Technical and economic analysis of the impact of changes in the initial steam parameters on the durability of elements of the main equipment of power plants // Materialy Vseros. nauch.-prakticheskoiy konf. s mezhdu-nar. uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri». Irkutsk, 2007. P. 119-124.

