



## ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАРЕЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. А. ДУБОВ

*Выявлены общие проблемы при оценке остаточного ресурса стареющего оборудования, обусловленные недостаточной эффективностью традиционных методов и средств неразрушающего контроля и несовершенством поверочных расчетов на прочность. Показано, что надежность и ресурс оборудования и конструкций определяют зоны концентрации напряжений — основные источники развития повреждений. Рекомендовано применение методов акустической эмиссии и магнитной памяти металла для своевременного выявления этих зон в соответствии с новым национальным стандартом ГОСТ Р 53006–2008.*

*Common problems in assessment of residual life of ageing equipment are revealed, which are due to insufficient efficiency of the traditional NDT methods and means and imperfection of verifying strength analysis. It is shown that the reliability and life of equipment and structures are determined by the zones of stress concentration as the main sources of damage development. It is recommended to apply the methods of acoustic emission and magnetic memory of the metal for timely detection of these zones in keeping with the new national standard GOST 53006-2008.*

Проблема обеспечения надежности работы оборудования, сосудов, газонефтепроводов и различных конструкций с каждым годом становится все более актуальной, так как старение оборудования во многих отраслях промышленности значительно опережает темпы технического перевооружения. Например, в энергетике по состоянию на сентябрь 2002 г. около 90 % оборудования тепловых электростанций исчерпало парковый ресурс и значительная его часть достигла физического износа. Указанная проблема усугубляется отсутствием научно обоснованной концепции технической диагностики и определения ресурса и недостаточной эффективностью традиционных методов и средств неразрушающего контроля (НК) металла.

На основе анализа существующих подходов к оценке остаточного ресурса стареющего оборудования, сложившихся в различных отраслях промышленности, можно выделить следующие общие тенденции:

— многие специалисты в области надежности оборудования переходят от вероятностных методов оценки ресурса, основанных на статистике отказов, к оценке индивидуального ресурса стареющего оборудования на основе комплексного подхода, сочетающего результаты разрушающего и НК с поверочными расчетами на прочность;

— при оценке ресурса заметна тенденция перехода от дефектоскопии к методам технической диагностики, основанным на сочетании механики разрушений, металловедения и НК. На первый план выходят методы НК напряженно-деформированного состояния (НДС) оборудования и конструкций;

— осознана необходимость 100%-го обследования стареющего оборудования с целью определения потенциально опасных зон.

Вместе с тем, следует отметить следующие недостатки и недоработки, существующие при реализации этих подходов. При комплексном применении различных методов и средств неразрушающего и разрушающего контроля нет строго определенного порядка и последовательности в их применении для конкретного объекта контроля (ОК).

Порядок, объем и периодичность контроля оборудования, как известно, определяется, с одной стороны, парковым (расчетным) ресурсом, повреждаемостью, межремонтным периодом, а с другой — наличием средств и методов контроля и их возможностями.

Только в отдельных, наиболее ответственных отраслях промышленности (например, атомная и тепловая энергетика), имеются специальные инструкции о порядке и периодичности контроля и продлению срока службы оборудования [1–3]. И даже в этих передовых отраслях (с точки зрения организации контроля за состоянием металла оборудования) существует проблема определения предельного состояния металла и оценки индивидуального ресурса оборудования [4].

Предлагаемые методики поверочного расчета на прочность можно условно разделить на четыре группы:

- по скорости коррозии металла;
- трещиностойкости металла;
- узлов расчета на усталость металла;
- узлов оборудования, работающего в условиях ползучести.

При этом главная недоработка известных методик заключается в том, что они предлагают низкий уровень допустимых напряжений  $[\sigma]$ . Как правило, уровень  $[\sigma] \leq \sigma_{0,2}/2$ , где  $\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести металла. Для ответственных конс-



трукций имеется требование в расчетах об уровне  $[\sigma] < 0,3\sigma_{0,2}$ . Эти требования, как известно, обусловлены работой металла оборудования в условиях скольжения и сдвиговой деформации. Как показывает практика, эти условия работы металла являются определяющими для надежности конструкции. Однако расчетными методами невозможно заранее прогнозировать на оборудовании зону возникновения площадок скольжения металла.

Кроме того, имеющиеся методики расчета на прочность, как правило, предполагают независимое протекание процессов коррозии, усталости и ползучести, хотя на практике эти процессы протекают одновременно в различном сочетании.

Существующие традиционные методы и средства НК (ультразвуковой (УК), магнитопорошковая дефектоскопия (МПД), радиографический контроль (РК), и др.) направлены, как известно, на поиск и нахождение конкретного дефекта. При этом определение размеров дефектов (глубина залегания, протяженность), расположенных в объеме основного металла или в металле сварного соединения, является сложной практической задачей. Однако если размеры дефекта определены (современные дефектоскопы решают эту задачу), необходимо оценить степень опасности этого дефекта и ответить на вопрос: «Развивается дефект или нет?». Для этого необходимо сделать поверочный расчет на прочность данного узла с учетом размеров дефекта. Очевидно, что в широкой практике такие расчеты не выполняются. Поэтому существующие нормы по допустимости дефектов (выявляемых УК и РК), например, в сварных соединениях, основаны преимущественно на статистике и в большинстве инструкций носят условный характер. Научно обоснованных норм по допустимости размеров дефектов с точки зрения механики разрушений и прочности оборудования в широкой практике нет.

Если рассматривать, например, возможности МПД и вихретокового методов контроля, направленных на определение поверхностных трещин, следует отметить следующее. Несмотря на то, что современная аппаратура и технология контроля с использованием указанных методов в настоящее время получила значительное развитие, до сих пор во многих отраслях промышленности для оборудования, находящегося в эксплуатации, нет норм на допустимость размеров поверхностных дефектов.

Существующие нормы и образцы, используемые, например, в МПД, были разработаны для новых изделий машиностроения. Для оборудования, находящегося в эксплуатации, эти нормы непригодны по следующим причинам: во-первых, окалина, коррозия наружного слоя металла не позволяют без зачистки и снятия этого слоя применять указанные нормы и методы контроля, а во-

вторых, эти нормы с позиций механики разрушений требуют специального обоснования практически для каждого ОК. Поэтому для ответственного оборудования, находящегося в эксплуатации (например, на тепловых электростанциях), выявленные поверхностные трещины на большинстве контролируемых узлов не допускаются и подлежат удалению [1]. Таким образом, образцы и нормы, установленные в инструкциях по МПД и вихретоковому методу контроля, используются в широкой практике как мера чувствительности используемых приборов.

Сложными и до сих пор нерешенными традиционной дефектоскопией на практике являются задачи контроля внутренних дефектов в угловых, тройниковых, тавровых сварных соединениях и определение язвин коррозии на внутренних поверхностях трубопроводов.

Следует отметить также низкую эффективность традиционных методов НК к определению дефектов на раннем этапе их развития. Все большее количество специалистов начинают понимать, что более опасным во многих случаях (особенно на стареющем оборудовании) является «преддефектное» состояние металла, когда на уровне структуры произошли необратимые изменения и повреждение из-за усталости может произойти внезапно и, как правило, в тех зонах, где оно не ожидается. Уровень чувствительности традиционных методов НК не позволяет выявить «преддефектное» состояние металла.

При оценке ресурса оборудования в настоящее время широко используются методы и средства НК структурно-механических свойств металла (измерение твердости, коэрцитивной силы и других магнитных характеристик металла, взятие «реплик» с целью определения структурных изменений и др.). Разработаны и применяются на практике комплексные методы НК физико-механических свойств металла, например, установки по совместному использованию магнитографического метода и метода кинетического индентирования [3], приборы и методы МЭИ для испытаний материалов вдавливанием или царапанием с целью экспресс-оценки механических свойств [5] и др.

В настоящее время в России имеется около 20 стандартов неразрушающего и частично разрушающего методов отбора проб. Все имеющиеся стандарты определяют механизм взятия проб, т. е. отвечают на вопрос: «Как сделать отбор пробы?». В 2003 г. принят первый ГОСТ, который регламентирует места отбора проб металла в зонах концентрации напряжений (КН) [6]. При взятии проб на оборудовании после длительной эксплуатации с целью оценки деградации металла специалисты дают заключение о состоянии металла только в месте взятия пробы. Распространить результаты



этого заключения на весь металл ОК (и даже отдельного элемента, например,гиба паропроводной трубы) не представляется возможным. Как правило, пробы металла берут в зонах наиболее вероятного развития повреждений по расчетным данным (или в зонах, где уже были повреждения металла).

Ранее было отмечено, что основными источниками повреждений оборудования являются зоны концентрации напряжений (ЗКН)<sup>1</sup>, возникающие в зонах устойчивых полос скольжения дислокаций и обусловленные действием рабочих нагрузок. Как показывает опыт контроля, эти зоны на поверхности металла оборудования проявляются в виде линий с размером по ширине и глубине в начале своего развития не более нескольких микрон. Вероятность попасть в эти зоны при отборе проб металла очень низкая. Очевидно, что такую задачу можно решить только при 100%-ом обследовании металла всей поверхности ОК высокочувствительными методами, позволяющими решать эту задачу.

Необходимость 100%-го обследования оборудования при оценке ресурса хоть и осознана, однако для реализации этой задачи на практике требуются большие затраты времени и материально-финансовые средства. С использованием традиционных методов НК (УК, РК, МПД) эта задача на практике не реализуется. Например, на современном паровом котле производительностью 1000 т/ч протяженность труб поверхностей нагрева составляет более 500 км. Поэтому обстучать, зачистить и измерить методом УК такое количество труб практически невозможно и эту работу ни одна электростанция не выполняет.

Аналогичные проблемы имеют место при контроле газонефтепроводов, протяженность которых в России достигает сотни тысяч километров, в нефтяной и химической отраслях промышленности — при контроле большого парка сосудов и трубопроводов, а также в других отраслях промышленности — при контроле стареющего оборудования и конструкций.

В этой связи следует отметить, что если нет возможности определить ЗКН и сделать отбор представительных проб металла, то, соответственно, теряется смысл выполнять поверочный расчет на прочность с целью оценки остаточного ресурса. Только в исключительных случаях, когда, например, металл подвержен коррозии с утонением стенки трубы (или обечайки сосуда) на большой площади, имеет смысл делать расчет на прочность с учетом уменьшения толщины стенки и скорости коррозии.

Таким образом, приведенный краткий анализ существующих методов НК повреждений и деградации металла показывает их низкую эффективность при оценке ресурса промышленного оборудования. Становится понятной и закономерной тенденция перехода от традиционной дефектоскопии к технической диагностике с использованием принципиально других методов контроля и подходов. Более сложные задачи, возникающие при оценке ресурса оборудования (по сравнению с обычной дефектоскопией при нормальной эксплуатации) требуют применения средств и методов более сложных в освоении, но более эффективных при контроле изменяющихся свойств металла. К таким методам следует отнести, прежде всего, методы и средства, позволяющие контролировать на практике НДС оборудования.

Проблемой измерений механических напряжений в работающих конструкциях с целью оценки их состояния в настоящее время занимаются все ведущие диагностические центры мира. Однако до сих пор эффективных методов контроля напряжений, пригодных для практики, не было предложено.

Анализ возможностей известных методов контроля и измерений напряжений и деформаций в основном металле изделий и сварных соединениях оборудования и конструкций позволяет назвать их существенные недостатки, основными из которых являются:

- невозможность использования большинства методов в области пластической деформации;
- локальность контроля, их непригодность для контроля протяженных конструкций;
- не учитывается изменение структуры металла;
- контроль выполняется только на поверхности изделий, невозможность оценки глубинных слоев металла и металла сварных соединений;
- требуется построение градуированных графиков на предварительно изготовленных образцах;
- требуется подготовка контролируемой поверхности и ОК (зачистка, активное намагничивание, клейка датчиков и пр.);
- сложность определения положения датчиков контроля по отношению к направлению действия максимальных напряжений и деформаций, определяющих надежность конструкции.

Большинство методов контроля напряжений основано на тарировке образцов при их растяжении. При этом не учитываются масштабный фактор и цикличность нагрузки, формирующие фактические напряжения (рабочие и остаточные) на реальном оборудовании.

<sup>1</sup> Следует отличать традиционное понятие «концентратор напряжений», отражающее особенности конструкции изделия, от материаловедческого понятия «концентрация напряжений», относящегося к зонам устойчивых полос скольжения дислокаций, обусловленных действием рабочих нагрузок.



Одни специалисты считают, что только объемные напряжения определяют надежность и только их значения необходимо измерять и учитывать при расчете оборудования и конструкций на прочность. Другие специалисты, наоборот, считают, что только поверхностные и локальные напряжения являются определяющими, ссылаясь на то, что повреждения развиваются в локальных ЗКН и с поверхностного слоя металла.

Кроме того, традиционные методы и средства НК напряжений, которые основаны на активном взаимодействии сигнала прибора с металлом конструкции, получают косвенную информацию о напряженном состоянии ОК, т. е. имеют недостаточную информативность физических полей, используемых при контроле.

Действительно, вводимое в исследуемый материал поле, взаимодействуя с собственными полями материала, меняет его свойства и характеристики НДС ОК. При этом характер, величина и время жизни изменений определяются динамическим соотношением энергий взаимодействующих полей. На практике при проведении диагностики такие изменения просто не учитывают.

Ранее было отмечено, что основными источниками развития повреждений являются ЗКН. Именно в них необходимо исследовать в первую очередь структурно-механические свойства металла. Существующие традиционные методы НК напряжений (рентген, ультразвуковой метод, шумы Баргаузена и др.) не позволяют решить эту сложную задачу — определение на оборудовании ЗКН, обусловленных действием рабочих нагрузок.

Например, в работе [7] отмечается, что на современном этапе ни одно из испытанных средств определения напряжений (было испытано около 10 различных приборов контроля напряжений) в реальных условиях эксплуатации газопроводов не может обеспечить достоверных сведений об НДС.

Таким образом, перечисленные выше недостатки известных методов контроля НДС обусловлены не только метрологическими особенностями, но в определенной степени физической сущностью этих методов, т. е. являются закономерными. Отсутствие метрологической базы для сертификации и поверки средств измерений характеристик НДС материалов (до сих пор в России и за рубежом нет единых эталонов и образцов) приводят к неоднозначности требований и ошибочности методического подхода к разрабатываемым средствам контроля.

В настоящее время имеется ряд теоретических и экспериментальных работ [8–10], в которых показано, что в основе прогнозирования надежности и оценки ресурса оборудования должна быть оценка энергетического состояния с определением запаса энергии до достижения предельной деформации. В указанных работах показано, что ме-

ханизм разрушения металла сопровождается проявлением различных физических эффектов (механических, тепловых, ультразвуковых, магнитных, электрических, электромагнитных, оптических), отображающих энергию деформации.

Отсюда следует, что, используя один или одновременно несколько параметров контроля, отображающих перечисленные эффекты, представляется возможность наиболее объективно оценивать НДС ОК.

Очевидно, что только «пассивные» методы диагностики НДС могут ответить на поставленные вопросы и являются наиболее пригодными для практики.

К «пассивным» методам НК, использующим энергию излучения конструкций, прежде всего, следует отнести:

- метод акустической эмиссии (АЭ);
- метод магнитной памяти металла (МПМ).

Эти два метода получили в настоящее время наибольшее распространение на практике для ранней диагностики повреждений оборудования и конструкций.

В работе [10] на основе практики применения метода МПМ разработана методология оценки энергетического состояния и ресурса сопротивляемости конструкционных материалов деталей и узлов объектов ответственного назначения. Эта методология получила название **энергодиагностика**.

Как показала практика, метод МПМ дополнительно дает информацию о фактическом НДС ОК, что позволяет более объективно определить причину образования ЗКН — источника развития повреждения.

Кроме того, с использованием метода МПМ предоставляется возможность выполнения 100%-го обследования оборудования с выявлением ЗКН и дефектов на раннем этапе их развития. Имея полную информацию о выявленных дефектах и возможном влиянии каждого из них на остаточный ресурс оборудования, можно без особых затруднений решить задачу определения объема восстановительных работ, необходимого для доведения ресурса работоспособности узлов до требуемого уровня.

Способ определения предельного состояния металла и ресурса оборудования с использованием параметров МПМ представлен в работе [11]. Этот способ оценки ресурса соответствует рекомендациям нового национального стандарта.

В ноябре 2008 г. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ от 13.11.2008 г. № 309-ст. утвержден и введен в действие новый стандарт ГОСТ Р 53006-2008 «Техническая диагностика. Оценка ресурса потенциально-опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования».



На рисунке представлена структурная схема определения остаточного ресурса оборудования с использованием экспресс-методов НК.

К экспресс-методам отнесены «пассивные» методы НК, использующие внутреннюю энергию металла конструкций:

- метод АЭ;
- метод МПМ;
- тепловой контроль.

Принципиальным отличием такого подхода к оценке ресурса является выполнение 100%-го обследования с выявлением всех потенциально опасных ЗКН — источников возникновения повреждений при дальнейшей эксплуатации оборудования.

В новом национальном стандарте ГОСТ Р 53006–2008 отражены также следующие основные положения:

— в качестве основных критериев предельного состояния металла предлагается использовать фактические энергетические характеристики, которые можно определить методами МПМ, АЭ и тепловым методом;

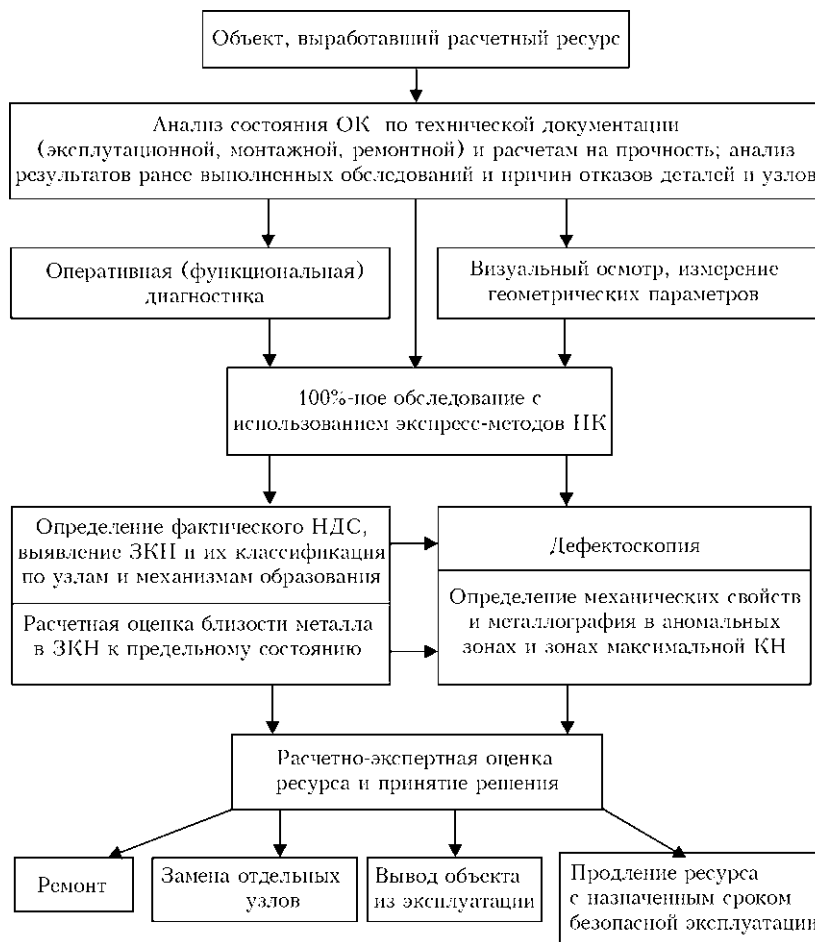
— учтены новые требования Ростехнадзора к экспертному обследованию оборудования и Федерального закона «О техническом регулировании»;

— учтены рекомендации ГОСТ Р 52330–2005 «Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования»;

— скорректирована структурная схема определения остаточного ресурса с акцентом на современные экспресс-методы технической диагностики;

— поверочные расчеты на прочность с оценкой остаточного ресурса предлагается выполнять для ЗКН, остающихся в эксплуатации, с учетом фактических структурно-механических свойств металла, выявленных при обследовании.

При реализации предлагаемого стандарта представляется возможным в большинстве случаев без выполнения сложных поверочных расчетов на прочность делать экспертную оценку ресурса на основе комплексного обследования оборудования и назначать срок безопасной эксплуатации. Для конкретного оборудования возможна разработка более конкретной методики оценки ресурса с учетом специфических особен-





ностей и требований, существующих в данной отрасли промышленности.

1. РД 10-577-03. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. — М.: СПО ОРГРЭС, 2003.
2. РД ЭО 0186-00. Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса сосудов энергоблоков АЭС. — М.: Концерн «Росэнергоатом», 1999. — 75 с.
3. РД ЭО 0185-00. Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов энергоблоков АЭС. — М.: Концерн «Росэнергоатом», 1999. — 63 с.
4. Концепция технического перевооружения энергообъектов электростанций РАО «ЕЭС России» в период до 2015 г. Документ РАО «ЕЭС России». — Москва, ноябрь, 2001.
5. Матюнин В. М. Методы и средства безобразцовой экспресс-оценки механических свойств конструкционных материалов. — М.: Изд-во МЭИ, 2001.
6. ГОСТ Р 52005-2003. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Общие требования. — М.: Изд-во стандартов, 2003.
7. Контроль напряженно-деформированного состояния газопроводов / А. А. Дубов, Е. А. Демин, А. И. Милаев, О. И. Стеклов // Газовая пром-сть. — 2002. — №2. — С. 58-61.
8. Комаровский А. А. Диагностика напряженно-деформированного состояния // Контроль. Диагностика. — 2000. — №2. — С. 22-27.
9. Скуднов В. А. Предельные пластические деформации металлов. — М.: Металлургия, 1989. — 176 с.
10. Власов В. Т., Дубов А. А. Физическая теория процесса «деформация-разрушение». — М.: ЗАО «Тиссо», 2007.
11. Дубов А. А. Способ определения предельного состояния металла и ресурса оборудования с использованием параметров магнитной памяти металла / Матер. XVI Рос. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и диагностика». — С.-Пб, сентябрь 2002.

ООО «Энергодиагностика»,  
Москва

Поступила в редакцию  
15.01.2010

## Уважаемые коллеги!

Техническая диагностика и неразрушающий контроль развиваются интенсивными темпами, становясь все более эффективными средствами повышения качества и надежности выпускаемой и эксплуатирующейся продукции. С целью улучшения качества материалов, публикуемых в журнале, редколлегия считает необходимым установить более тесный контакт с читателями, мнения и пожелания которых будут учтены при формировании тематики журнала. Вашему вниманию представляется анкета. Для тех, кто желает высказать свои пожелания предлагаем заполнить анкету и выслать ее по адресу:

03680, Украина, г. Киев, ул. Боженко, 11,  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ;  
тел.: (044)271-23-90; факс: (044)528-34-84;  
E-mail: journal@paton.kiev.ua

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА  
И  
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

### АНКЕТА

Наименование Вашего предприятия, почтовый адрес с индексом:

Является ли Ваше предприятие подписчиком журнала ТДиНК?

Дефицит какой информации по ТДиНК Вы ощущаете?

Предложите тему номера или статьи

Ваши рекомендации журналу ТДиНК

Сведения о лице, заполнившем анкету  
Фамилия, имя, отчество

Должность

Телефон, факс

E-mail