

**И.Н. Сильвестров**, к.т.н.,

**А.В. Корнилова**, к.т.н.,

ЗАО "Прочность", г. Москва

## ЭТАПЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В настоящий момент имеется большая нормативная база (РД, методики и т.д.), регламентирующая этапы проведения экспертизы промышленной безопасности, в том числе объемы натурного обследования. Однако, в имеющихся нормативах не приводится внутренняя логика проводимых исследований и их интерпретация для дальнейшей оценки технического состояния и остаточного ресурса.

В нашей организации различают 3 типа опасных производственных объектов:

1. **Технологические объекты** (например, реформер, УДМ, УПА, нагревательные печи и т.д.). Безопасность эксплуатации и остаточный ресурс этих объектов, в основном, обеспечивается соблюдением режимов работы и замены агрегатов, указанных в технологической инструкции.
2. **Силовые объекты** (например, сталеразливочный стенд, подкрановые балки, миксер и т.д.). Безопасность эксплуатации и остаточный ресурс объектов обеспечивается техническим состоянием, прочностью и выносливостью силовых элементов конструкции. Режимы технологического процесса оказывают влияние в наименьшей степени.
3. **Смешанные объекты** (например, конвертер, доменная печь, воздухонагреватель и т.д.). Безопасность эксплуатации и остаточный ресурс этих объектов обеспечивается как техническим состоянием, прочностью и выносливостью силовых элементов конструкции, так и режимами технологического процесса, которые оказывают существенное влияние на техническое состояние силовых элементов конструкции.

Тема данного доклада касается, прежде всего, 2 и 3 групп объектов.

Цель натурного обследования оборудования – определение текущего технического состояния и его прогноз на ближайшие 1 – 5 лет.

Перед проведением натурного обследования проводится изучение технической документации, технологических параметров, съем технологических параметров работающего объекта, с целью определения силовых, тепловых и технологических

нагрузок, изменение их в течение кампании, циклики и длительности их воздействия на объект.

Первый этап натурного обследования – визуальный осмотр и контроль объекта. На этом этапе устанавливается соответствие объекта ПБ, проекту, дается предварительная оценка технического состояния. Выявляются поверхностные дефекты и необходимость их немедленного устранения. Определяются зоны для последующего инструментального контроля (исходя из опыта обследования аналогичных конструкций, визуального контроля, требований РД и в целом по всей поверхности объекта для определения общего состояния конструкции), места взятия образцов для испытаний.

Инструментальное обследование намеченных зон. Основными методами неразрушающего контроля являются следующие:

- Ультразвуковой контроль (в основном качества сварных швов). Наиболее универсальный, но наиболее сложный при контроле метод. Выявляет как плоскостные, так и объемные дефекты любой глубины залегания, в том числе и поверхностные. К недостаткам метода можно отнести большой объем зачисток поверхности контроля и, как правило, односторонний доступ к объекту. Определенную проблему составляет интерпретация выявленных дефектов (непровар, трещина, шлаковые включения и т.д.) и оценка их опасности. Существуют методики проведения УЗ контроля, например, РОСЭК РД 001-03, в которых приводятся браковочные критерии. Однако необходимо учитывать, что они разработаны для контроля вновь изготавливаемых конструкций (для длительно эксплуатирующихся объектов они слишком жесткие), кроме того, не учитывают, или почти не учитывают, уровень напряжений в контролируемой зоне. С учетом сказанного, опасность дефекта, превышающего браковочный уровень соответствующего РД, необходимо рассматривать с позиций механики разрушения.
- Магнитопорошковая дефектоскопия (МПД), капиллярный метод контроля поверхностных трещин.
- Токовихревой метод.
- Метод магнитной памяти металла.

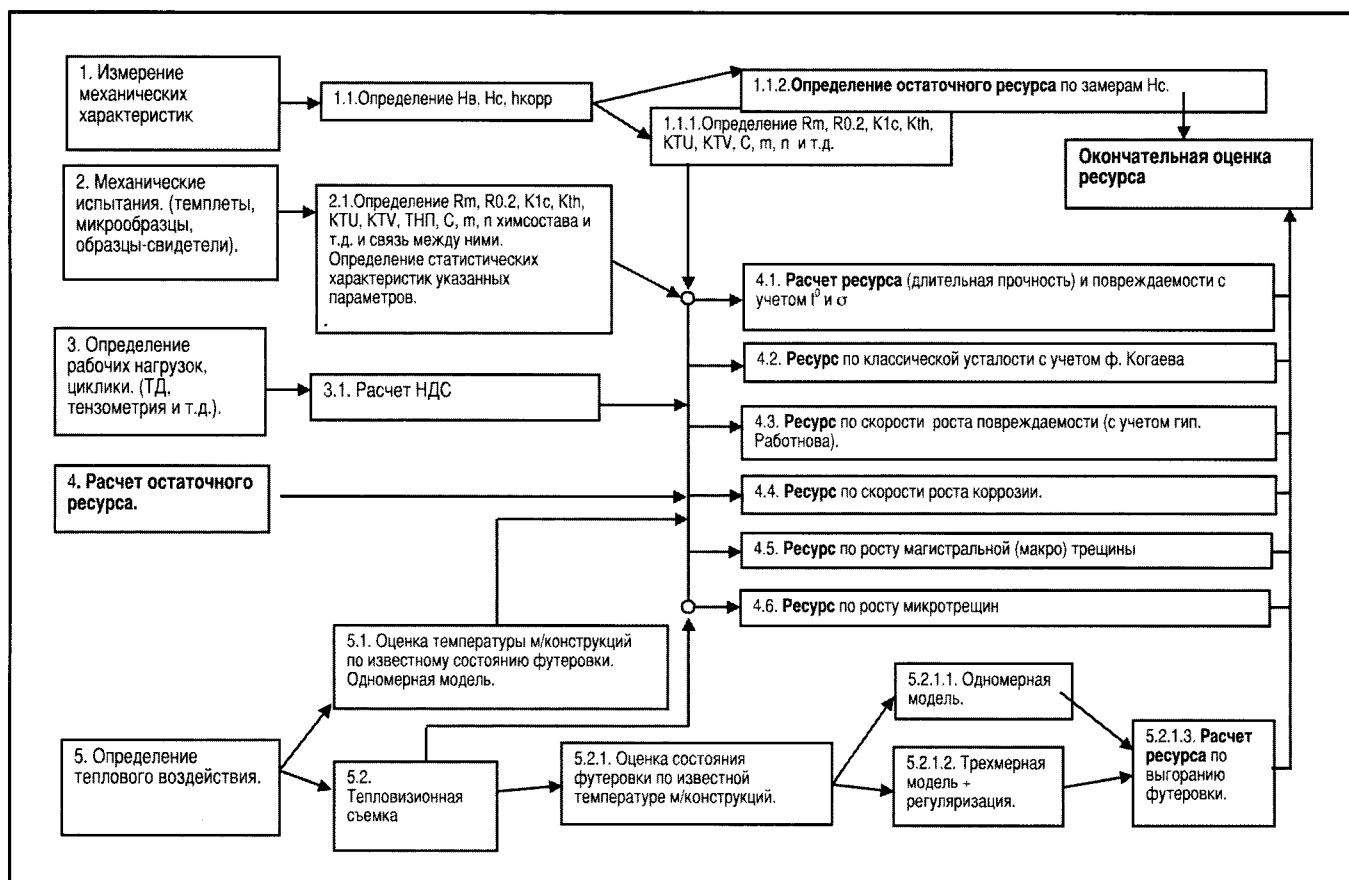


Рис. 1 Упрощенная схема оценки надежности и остаточного ресурса металлургического оборудования

- Измерение коэрцитивной силы.
- Метод структурной памяти металла, развиваемый ЗАО «ПРОЧНОСТЬ».

Учитывая то, что надежное выявление дефектов одним методом не всегда возможно, для повышения надежности обследования необходимо проведение контроля несколькими методами. Также производятся измерения:

- 1) Толщины металла.
  - 2) Твердости металла.
  - 3) Остаточных напряжений.
  - 4) Распределения температурных полей на поверхности объекта по фазам его работы.
  - 5) Тензометрия и т.д.
- Экспериментальное определение нагрузок на объект по фазам его работы, в том числе динамические и вибрационные нагрузки.
  - Исследование отобранных микрообразцов.
  - Химический состав металла.
  - Микроструктурный анализ.
  - Определение механических характеристик по вырезанным темплетам, включающие:
    - Предел прочности  $\sigma_b$ , предел пластичности  $\sigma_{0.2}$ , относительные удлинение и сужение.
    - Ударная вязкость и переходная температура

хрупкости.

- Кривая усталости и предел выносливости.
- Вязкость разрушения и кинетическая диаграмма роста трещины.

Проведение расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) силовой конструкции и прогнозирование его изменения при дальнейшей эксплуатации. Производится с учетом геометрии и конструктивных особенностей реальной конструкции с учетом результатов механических испытаний образцов, степени коррозии, свойств металла, выявленных дефектов, расчетно и экспериментально определенных нагрузок, а также распределения температурных полей. Определение размеров опасных повреждений по критическим зонам конструкции и сравнение их с реально выявленными при инструментальном обследовании, расчет остаточного ресурса по безопасному росту усталостной трещины. Расчет на усталостную прочность и определение остаточного ресурса по усталостной прочности. Определение остаточного ресурса по скорости роста коррозии.

На основе проведенных исследований и расчетов делается окончательная оценка остаточного ресурса конструкции объекта. Исходя из того, что остаточный ресурс конструкции является стохастической величиной, а расчетная величина, как правило, дает 50% оценку, для установления

срока безопасной эксплуатации объекта необходимо ввести коэффициент запаса. Величина коэффициента запаса может варьироваться в пределах 3-12 в зависимости от условий работы и степени ответственности конструкции. Срок безопасной эксплуатации объекта может быть установлен и при помощи вероятностного расчета остаточного ресурса, однако в настоящее время, необходимые данные по статистическим распределениям исходных величин для проведения такого расчета в полном объеме, отсутствуют. Упрощенная схема оценки надежности и остаточного ресурса металлургического оборудования приведена на диаграмме (рис. 1).

При расчете общей долговечности и остаточного ресурса необходимо выполнение следующего алгоритма:

- Определение механических характеристик (при необходимости и химического состава) материала объекта,
- Определение температуры эксплуатации,
- Определение реальной геометрии объекта,
- Определение спектра нагрузок, действующих на объект,
- Определение карты дефектов (визуально и методами неразрушающего контроля),
- Расчет напряженно - деформированного состояния объекта численными методами (МКЭ, МГЭ и т.п.) с учетом пп.1 - 5 (в некоторых случаях возможно дополнить результатами тензометрирования),
- Определение предельного состояния (или сочетания предельных состояний) объекта.
- Выбор наиболее адекватного метода расчета долговечности и остаточного ресурса.

Одним из наиболее распространенных предельных состояний является многоцикловая усталость (часто сопровождается коррозией, износом, ползучестью и т.д.). В большинстве случаев сопутствующие предельные состояния существенно ускоряют процесс усталости, и возникает необходимость учитывать это при расчете остаточного ресурса конструкции. В настоящее время наиболее точным методом определения долговечности является расчет по критериям механики разрушения (МР). Для оценки долговечности по МР необходимо знать комплекс характеристик трещиностойкости, которые определяются экспериментально по соответствующим методикам, общая идеология которых описана в [1]. На рис. 1 принято:  $K_{th}$ ,  $K_{fc}$ ,  $K_{1-2}$ ,  $K_{2-3}$  - пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН), соответствующее началу страгивания трещины, циклическая вязкость

разрушения, точки перехода от низкоамплитудного участка кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) к линейному (перисовскому), от перисовского к высокоамплитудному соответственно:

$$(MPa \sqrt{m})$$

Для некоторых материалов характеристики КДУР при соответствующих температурах испытаний и коэффициентах асимметрии циклов:

$$(R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}})$$

определены и приведены в справочной литературе. Для других делаются попытки связать эти параметры с ранее определенными механическими характеристиками. В институте им. А.А. Байкова предложена для этой цели константа разрушения  $\Delta$  (определяемая как отношение длины дислокационной трещины скола к длине участка разрыва межзатомных связей, для сталей среднее значение  $\Delta = 0,11$ ) и  $K_{1*}^R$  - размерная константа, контролирующая максимальный размер в условиях плоской деформации при реализации условий макроотрыв:

$$(K_{1*}^R = 40,3 MPa \sqrt{m}).$$

Обобщенные зависимости можно свести в таблицу.

Параметр	Зависимость	Авторы
Вязкость разрушения в условиях плоского деформированного состояния	$K_{IC} = \sqrt{\rho \tau_s E (1 - \mu)^{-1} \ln(1 - \phi)^{-1}}$ <p><math>\rho</math> - параметр структуры (первичного аустенитного зерна, <math>\tau_s = 0,5\sigma_{0,2}</math>, <math>E</math> - модуль упругости, <math>\phi</math> - относительное сужение.</p> $K_{IC} = K_{1*}^R \Delta^{-\frac{1}{2}} \left[ \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n} \right]$ <p><math>n</math> - параметр равный тангенсу угла наклона перисовского участка КДУР (<math>n_{max} = 6</math> для сталей)</p>	Андрейкив А.Е.  Иванова В.С.
Тангенс наклона перисовского участка КДУР	$n = 3, C = 2,785 \times 10^{-11}$ низколегированные стали, $n = 3, C = 4,23 \times 10^{-11}$ малоуглеродистые стали сварка $n = 3,5$	Международный институт сварки
Циклическая вязкость разрушения	$K_{fc} = \frac{K_{IC}}{\Delta^{1/8}}, K_{2-3} = K_{IC}$	Иванова В.С.
Пороговое значение КИН	$K_{th} = K_{IC} \Delta$ $K_{th} = 12,7 - 0,006R_{0,2} - (1,37 - 0,0065\sigma_{0,2})R$ $R_{0,2}$ - предел текучести материала	Иванова В.С. Когаяв В.П.
Критический КИН в условиях плоского напряженного состояния	$\left( \frac{K_C}{K_{IC}} \right)^2 = 1 + 1,4 \left( \frac{K_{IC}}{R_{0,2}} \right)^4 \cdot c^{-2},$ $C = 2,5 \left( \frac{K_{IC}}{R_{0,2}} \right)^2$	Керштейн И.М.
КДУР	$V = \frac{1}{A} \left[ (K_{fc} - K_{th}) / (K_{1max} - K_{th}) \right]^{m-1}$ <p><math>K_{1max}</math> - максимальный за цикл нагружения КИН, <math>A, m</math> - параметры кривой усталости</p>	Андрейкив А.Е.
Зависимость роста скоростей развития усталостных трещин от температуры	$\lg(V_t / V_{t=20}) = 0,00176(t - 20).$	Т. Омута

Циклическая вязкость разрушения не зависит от  $R$ . Перисовский участок имеет сравнительно

небольшую зависимость от этого параметра.

С увеличением температур наблюдается рост скоростей усталостных трещин, связанный с уменьшением предела текучести и активизацией окислительных процессов и начинает сказываться частота нагружения (при снижении частоты увеличивается скорость).

В высокоамплитудном ( $K_{2-3} - K_{fc}$ ) и низкамплитудном ( $K_{th} - K_{1-2}$ ) тангенс наклона касательной к КДУР в логарифмических координатах на 25% больше параметра  $n$ . Интегрируя линейный (перисовский) участок КДУР от  $K_{th}$  до  $K_{2-3}$  определяют число циклов, приходящихся на участок роста трещины.

На первом (низкоамплитудном) участке КДУР скорости роста трещины значительно ниже ( $V_{cp} = 10^{-11} - 10^{-12}$  м/цикл). Расчет долговечности без учета низкоамплитудного участка является приемлемым в инженерной практике, т.к. это допущение идет в запас долговечности.

Альтернативой определению долговечности и остаточного ресурса по критериям механики разрушения является расчет по усталостным гипотезам. В настоящее время развиты и нашли свое применение различные гипотезы накопления усталостной повреждаемости, каждая из которых описывает свой аспект процесса усталости. Гипотезы можно классифицировать: линейные (Пальмгрена, Мэнсона, Когаева В.П.), нелинейные – учитывающие снижение предела выносливости при действии спектра нагрузок (Генри, Гатса, Марко- Старки и др.), основанные на предположении о превалирующем влиянии блока нагружения с максимальной амплитудой (Кортена – Долана и др.). В ЗАО «ПРОЧНОСТЬ» разработан алгоритм и составлена программа его реализации по расчету многокритериальному расчету долговечности и остаточного ресурса. Для принятия решений об уровне поврежденности конструкции привлекается математический аппарат принятия решений в условиях неопределенности.

Для определения долговечности конструкций, работающих в условиях нескольких предельных состояний, расчет ведут по критериям трибофатика, науки о взаимном влиянии поверхностного разрушения и объемного повреждения [2- 4].

#### Литература:

1. *Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие т.1-4 под ред. В.В. Панасюка. Киев.: Наукова Думка. 1990.*
2. *ГОСТ 30638-99. Трибофатика. Термины и определения.*
3. *ГОСТ 30755-2001. Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общетехнические требования.*
4. *ГОСТ 30754-2001. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость.*