

О перспективах диагностики процесса усталости металла

Пермикин В.С.

Этот материал мы представляем как приглашение к сотрудничеству, как попытку найти инвестора для проведения научных исследований

Причины исчерпания ресурса деталей, изготовленных из конструкционных металлов, можно укрупнено, в соответствии с основными внешними воздействиями и механизмами разрушения, разделить на четыре группы:

1) **коррозия и эрозия** - изменение геометрических размеров и формы детали при химическом или абразивном воздействии;

2) **деградация свойств** - изменение со временем физических (в частности механических) свойств металла в результате эксплуатации его при высокой температуре или при высоких напряжениях;

3) **ползучесть** — изменение прочностных свойств металла и геометрических размеров детали при одновременном воздействии высоких напряжений и температуры;

4) **усталость** — разрушение детали при периодически изменяющейся механической нагрузке, то есть в результате действия в детали циклически изменяющихся напряжений.

В действительности часто два и более механизма действуют одновременно. Например: в так называемой зоне фазового перехода турбин металл валов, лопаток и дисков разрушается из-за коррозионной усталости при одновременном воздействии повышенной температуры. А металл бандажных колец генераторов деградирует под воздействием высоких (внешних и внутренних - привнесенных при изготовлении) напряжений, и затем в нем во влажной атмосфере развивается межкристаллитная коррозия.

Из приведенных выше причин исчерпания ресурса механизм усталости металлов, в настоящее время, является наименее понятным и изученным механизмом разрушения. По всей видимости, изменения всех физических свойств металла, происходящие при усталости, столь малы, что, не смотря на значительные усилия многих лабораторий мира, направленные на ее изучение, в настоящее время не существует методов диагностики процесса усталости. Но в тоже время усталость металла - это одна из самых распространенных причин разрушения деталей и узлов.

В теплоэнергетике часто разрушения происходят по экзотическому (для других отраслей промышленности) механизму - по механизму ползучести.

Ползучесть является причиной разрушения гнутых участков (гибов) и сварных соединений высокотемпературных паропроводов, ряда деталей турбин и котлов.

В настоящее время процесс ползучести вполне поддается диагностике, и в том числе, благодаря исследованиям, проведенным на предприятии УралОРГРЭС. Результаты диагностики металла позволяют достаточно надежно прогнозировать срок дальнейшей безопасной эксплуатации деталей, эксплуатирующихся в условиях ползучести.

Ниже приведено сравнение современного состояния изученности механизмов разрушения металла - ползучести и усталости.

ПОЛЗУЧЕСТЬ

Распространённость: не превышает 1% от общего числа разрушений. Проявляется только при высоких температурах и поэтому мало распространена. По данному механизму разрушается часть деталей турбин, котлов, паропроводов (в энергетике), корпуса ректификационных колонн (в химической промышленности), детали авиационных турбин.

УСТАЛОСТЬ

Один из самых распространённых механизмов разрушения. Встречается повсеместно во всех механизмах и конструкциях, изготовленных из металлов. Доля в общем числе разрушений составляет десятки процентов.

Диагностические признаки - физические параметры металла, которые изменяются в процессе эксплуатации

Макропараметры

1. Общая остаточная деформация детали ~ до 1 %.
2. Изменение плотности металла до 1 %.
3. Изменение скорости ультразвуковых волн до 2-3 %.

В данное время общепризнанные параметры, коррелирующие с исчерпанием ресурса отсутствуют.

Микропараметры

1. Появление микропористости ($\sim 10^{-3}$ мм) в микроструктуре примерно на половине общего срока эксплуатации. Наблюдается при металлографических исследованиях в оптический микроскоп.

1. Появление микрорыхлот в концентраторах напряжений предшествует появлению трещин. В данное время общепризнанные микропараметры, коррелирующие с исчерпанием ресурса и которые можно измерить, не

разрушая деталь, отсутствуют.

2. Изменение дислокационной структуры ($10^{-4} \div 10^{-6}$ мм) наблюдается при тонких лабораторных исследованиях.

2. Изменения микро-структуры на уровне $10^{-4} \div 10^{-6}$ мм наблюдаются только при тонких лабораторных исследованиях.

Существовавшие (для ползучести) или существующие (для усталости) методы диагностики на момент начала разработки, их возможности и характеристика

1. Измерение остаточной деформации – малая информативность из-за малого изменения параметра (не более 1%).

Отсутствуют какие-либо физические методы диагностики.

2. Оценка методом реплик микропористости (металлографический метод) - метод качественный (оценка по 5-7 баллам). Большая трудоёмкость и локальность (исследуется несколько квадратных сантиметров поверхности).

Задачи, стоявшие (для ползучести) или существующие (для усталости) перед разработчиками методики

Создать количественный и достаточно оперативный неразрушающий метод контроля, коррелирующий с имеющимися методами (остаточная деформация и степень поврежденности микроструктуры микропорами - (метод реплик).

Найти какой-нибудь параметр (хотя бы качественный) для оценки состояния.

Что сделано в процессе разработки (десятилетний период) в УралОРГРЭС.

1. Разработаны методы и устройства для диагностики ползучести гибов паропроводов и роторов высокого давления по скорости ультразвуковых волн (защищены четырьмя патентами).

Разработана форма образцов для усталостных испытаний. Эти образцы позволяют методы, применяемые ранее при изучении ползучести, использовать и при изу-

2. Разработан портативный микроскоп.
3. Усовершенствован метод приготовления шлифов для наблюдения микропор ползучести.
4. Установлено, что микродефекты - мик-

ропоры, которые мы наблюдаем на шлифе - это результат растравливания микрорыхлот, которые и образуются при ползучести.

5. Установлено, что во всех сталях при ползучести протекает процесс графитизации.

6. Разработан лак для металлографических реплик.

7. Разработана методика расчета остаточного ресурса металла, эксплуатирующегося в условиях ползучести, по результатам контроля микроповрежденности.

Затраты на разработку методики

Действительные: около 1,0 млн. \$.

1. Первоначально работы по ультразвуковым исследованиям финансировало Тюменьэнерго. Договор на 600 тыс. руб. действовал с 1985 по 1990 г.г. (в то время курс доллара составлял около 0,6 рубля). Разработан и создан стенд для ультразвуковых исследований, который состоял из более 25 приборов оригинальной конструкции.

2. С 1991 по 2000 г.г. разработка устройств и исследование механизма ползучести финансировались из частных средств. Расходы превышают 200 тыс. \$.

Прогнозируемые: более 2 млн. \$.

Статьи расхода:

1. Постоянно действующий коллектив из 2-3 сотрудников.

2. Лабораторные приборы, которые необходимо приобрести для первоначальных исследований:

- спектрометр комбинационного рассеяния (метод Рамана);
- вихрековый сканер;
- прибор для измерения термо-ЭДС;
- прибор для измерения малых магнитных полей;
- стенд для усталостных испытаний металла;
- настольный станок для плоской шлифовки.

3. Исследования сторонних организаций.

Дополнительные условия:

договор между организацией и исследователями о правах на интеллектуальную собственность (при частичном финансировании).

На чём основан навязчивый оптимизм, что усталость металла можно будет оценивать с помощью неразрушающих методов?

1. Для изучения усталости и поиска диагностических параметров можно применить те же методы, которые применялись при изучении ползучести.

При исследованиях ползучести, проведенных на предприятии «УралОРГРЭС», обнаружено, что на последней ускоренной стадии ползучести по границам зёрен металла образуются не микропоры (округлые и полые), как ранее было принято считать, а компактные микрорыхлоты. В микропоры эти микрорыхлоты превращаются в процессе приготовления металлографического шлифа при применении специфичной методики -многократного повторения цикла «полировка + травление».Этот факт ставит процесс ползучести, по типу образующихся микродефектов, в один ряд с другими видами разрушений металла такими, как разрушение при превышении предела текучести или усталость.

При всех видах разрушений, при которых в металле наблюдается остаточная деформация, на этапе перед зарождением трещин образуются микрорыхлоты. При кратковременных испытаниях в шейке образца образуются микрорыхлоты внутри зёрен и между ними. И при усталости металла в местах концентраций напряжений разрыхляются границы зёрен, расположенные перпендикулярно максимальным напряжениям. Один тип микродефектов, предшествующих появлению трещин, может свидетельствовать о единстве механизмов разрушения конструкционных металлов при различных внешних воздействиях.

Но это и значит, что при изучении усталости могут быть применены методы, оказавшиеся полезными при изучении ползучести.

2. Практически, ни один из механизмов разрушения не действует в одиночку.

Это обстоятельство позволяет надеяться последовательно решать задачи диагностики конкретных групп деталей и узлов, эксплуатирующихся в одинаковых условиях. Диагностика при этом может быть построена не на основе оценки главного действующего механизма разрушения - усталости (и слабо себя проявляющего), а с помощью оценки сопутствующих механизмов, для которых уже имеются разработанные методы.