

А. Н. ПРУДНИКОВ,

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

Аннотация

Рассмотрены способы реализации оценки технического состояния магистральных трубопроводов по параметрам напряженно-деформированного трубопровода и результатам неразрушающего контроля.

Ключевые слова: диагностирование, трубопровод, напряженно-деформированное состояние.

Магистральные трубопроводы, несмотря на внешнюю конструктивную простоту, обладают сложной схемой силовых воздействий (в том числе периодических, протекающих за короткий промежуток времени), поэтому эпизодическое диагностическое обследование участков линейной части методами дефектоскопии не в полной мере позволяет оценить их техническое состояние.

Отсутствие на магистральных трубопроводах совершенных автоматизированных систем мониторинга усложняет задачу обеспечения промышленной безопасности трубопроводного транспорта. Поэтому, необходимость методологической базы для проведения комплекса диагностических работ и прогнозирования остаточного ресурса всех потенциально опасных элементов магистрального трубопровода по их фактическому состоянию является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Для решения этой проблемы требуется информация о нагрузках и воздействиях на трубопровод, имеющих место в различные периоды эксплуатации, распределение напряженно-деформированного состояния (далее - НДС), что сделает возможным оценить надежность и остаточный ресурс конструкции.

Существующая система диагностирования линейной части магистральных нефтепроводов в процессе эксплуатации включает комплекс методов:

- методы дистанционного обследования (авиасъемка, вертолетные облеты);
- внутритрубная диагностика (магнитные, ультразвуковые, вихретоковые сканеры-дефектоскопы);
- интегральные методы обследования (геодезические измерения, акустико-эмиссионный метод; системы контроля утечек, состояния изоляционного покрытия и т.п.);
- локальные методы обследования (методы неразрушающего контроля).

Диагностические системы внутритрубного контроля способны

обнаруживать максимально широкий спектр серьезных дефектов, включая внешнюю и внутреннюю коррозию; дефекты потери сечения в поперечных и спиральных сварных швах; производственные дефекты (расслоения, включения); связанные с вмятинами (включая идентификацию самих вмятин); повреждения, возникшие при строительстве трубопровода (риски, задиры) и другие.

Традиционные методы неразрушающего контроля также используются для обследования и получения необходимой информации о техническом состоянии. Однако осуществить сплошную диагностику при помощи традиционных методов неразрушающего контроля нельзя. Кроме того, традиционные методы и средства НК направлены на поиск и нахождение конкретного дефекта. Если даже размеры дефекта можно определить, то сложно оценить степень опасности и развития дефекта. Научно обоснованных норм по допустимости размеров дефектов с точки зрения механики разрушений и прочности оборудования в широкой практике не существует.

Следует отметить также непригодность традиционных методов неразрушающего контроля для определения дефектов на раннем этапе их развития. Последнее становится все более важным, так как во многих случаях более опасным (особенно на стареющем оборудовании) является преддефектное состояние металла, когда в его структуре произошли необратимые изменения, и повреждение из-за усталости может возникнуть внезапно и, чаще всего, в тех зонах, где оно не ожидается. Уровень чувствительности традиционных методов неразрушающего контроля не позволяет выявить такое преддефектное состояние металла.

Поэтому процесс оценки остаточного ресурса стареющих трубопроводов имеет тенденцию перехода от дефектоскопии к методам технической диагностики, основанным на сочетании механики разрушений, металловедения и неразрушающего контроля, то есть к методам неразрушающего контроля напряженно-формированного состояния.

Тенденция перехода от традиционной дефектоскопии к технической диагностике с применением комплексного подхода, включающего определение параметров дефектов, оценку распределения внутренних (остаточных) напряжений и нахождение фактических структурно-механических характеристик металла, сдерживается в первую очередь низкой эффективностью существующих методов и средств контроля напряженно-деформированного состояния оборудования.

Мониторинг напряженно-деформированного состояния объектов

Мониторинг напряженно-деформированного состояния включает в себя процессы создания измерительной сети, обработки сигналов, анализа и управления данными.

В системах непрерывного мониторинга напряженно-деформированного состояния [1] в качестве первичных преобразователей используют датчики различных физических принципов действия: тензорезистивные, струнные,

волоконно-оптические датчики, электромагнитные (эффект Баркгаузена), вихретоковые датчики, микроэлектромеханические системы. Возможно использование и других типов датчиков, например, индуктивных, емкостных, акустических, датчиков измерения коэрцитивной силы, однако ввиду их не востребоваемости для систем мониторинга, работающих в полевых условиях, в данной работе они не рассматриваются.

Наибольшее распространение в системах мониторинга получили тензорезистивные (проволочные, пленочные, полупроводниковые), струнные и оптоволоконные датчики.

В сравнении с другими типами датчиков волоконно-оптические датчики обладают следующими преимуществами:

- состоят из электрически непроводящих материалов, возможность безопасно использовать во взрывоопасной среде;
- не подвержены электромагнитным помехам;
- материалы могут быть химически инертны и не подвержены коррозии;
- имеют очень широкий диапазон рабочих температур (гораздо больше, чем у электронных устройств);
- имеют возможность мультиплексирования.

Недостатки: сложная конструкция; большой разброс параметров; невысокая точность.

Волоконно-оптические датчики могут быть разделены на три класса: интерференционные датчики (датчики SOFO, Фабри-Перро, Маха-Цендера, Саньяка), датчики интенсивности рассеивания (Рэля - OTDR, Бриллюэна - BOTDR) и датчики на основе решеток (брэгговская решетка - FBG, решетка с большим периодом - LPG). Среди всех наибольшее применение в системах мониторинга получили волокна с решетками Брэгга (FBG).

Среди перспективных разработок, пока не нашедших широкое коммерческое применение в системах мониторинга, можно отметить датчики метода эффекта Баркгаузена (МЭБ), вихретоковые MWM датчики и MEMS датчики.

Однако, измерения, выполненные МЭБ, зависят от структуры материала, химического состава и интенсивности остаточных или приложенных напряжений.

Меандровые вихретоковые датчики (MWM датчики) также можно применять для мониторинга НДС на стальных материалах (в том числе динамического). MWM датчики допускают измерения в бесконтактном режиме, а также возможен контроль НДС объекта, изготовленного из сплава цветных металлов, если поверхность покрыта ферромагнитным покрытием.

Миниатюризация датчиков и возможности нанотехнологий привели к созданию целого класса устройств под названием MEMS датчики (микроэлектромеханические системы). Существуют MEMS датчики измерения деформаций с различным принципом действия. Такие датчики способны измерять статические и динамические деформации с разрешением 0,1 мк. Ограничения или достоинства/недостатки MEMS датчиков взаимосвязаны с

принципом действия, например, тензорезистивные MEMS датчики деформации просты в установке, однако чувствительны к температуре, в отличие от емкостных датчиков деформации и т.п.

Измерительная сеть системы контроля НДС

Общие принципы расстановки измерительных датчиков в системе мониторинга:

- количество датчиков должно быть минимизировано с экономической точки зрения;
- места установки датчиков должны обеспечивать измерение на локальных участках и должны быть достаточными для того, чтобы была возможность получить восстановленную картину полей распределения НДС;
- расстановка датчиков должна быть оптимизирована таким образом, чтобы внешние факторы и шум не снижали качество результатов измерения, а каналы связи должны быть способными к передаче требуемого объема данных и не происходило перегрузки датчиков от частых опросов.

Оптимизацию расположения датчиков можно рассматривать как трехступенчатый процесс: определение количества датчиков; размещение датчиков; оценка эффективности различных конфигураций датчиков.

Минимальное количество датчиков, как правило, не может быть меньше, чем количество определяемых первичных физических величин, на верхний предел количества обычно налагаются ограничения по стоимости или доступности оборудования. Большее количество датчиков необходимо для получения избыточной информации для последующей компьютерной обработки, построения полей визуализации.

Для ограниченного количества датчиков системы мониторинга, проблема состоит в оптимизации размещения датчиков и выбора способа оптимизации. Некоторые подходы требуют отдельных дискретных вычислений, некоторые итерационных вычислений, а многие определяют экстремум целевой функции.

Значительный класс методов возник из концепции оценки всех мест установки датчика в отношении некоторой целевой функции, а затем итерационное удаление тех датчиков, которые меньше влияют, пока не останется необходимое количество измерительных точек.

Для метода эффективной независимости (EI), места установки датчиков ранжируются в соответствии с их вкладом в определитель информационной матрицы Фишера. По мере их влияния на каждом шаге итерации происходит удаление менее значимых.

Метод модальной кинетической энергии (KE) предполагает, что датчики будут иметь максимальную эффективность расположения, если они расположены в точках с максимальным значением модальной кинетической энергии измеряемого параметра.

Применяют также и другие итерационные методы. Следует отметить, что итерационный процесс не обязательно должен быть направлен на уменьшение массива данных. Возможен процесс, когда точки установки датчиков

итерационно расширятся, чтобы включить те места расположения, которые дают наибольшее увеличение определителя информационной матрицы Фишера.

Часть методов использует достижения в области комбинаторной оптимизации - генетические алгоритмы, нейронные сети.

Интерпретация данных систем мониторинга НДС

Существующие методы контроля НДС не позволяют быстро, надежно и в удобном формате отображать картину распределения напряжений в сложной конструкции, которой является трубопровод. Места, доступные для измерений, не являются определяющими для оценки прочности и долговечности, и требуется знание распределения напряжений на недоступных для измерений участках поверхности, в сечениях или в некотором заданном объеме элемента конструкции.

Для решения этой обратной задачи прибегают к численным методам (наибольшее распространение получил метод конечных элементов). Так как определение полей деформаций и напряжений в объеме исследуемого элемента приводит к решению некорректно поставленных задач, то при применении традиционных численных методов построения решений картина НДС чаще всего далека от действительности.

Поэтому определение поля напряженно-деформированного состояния трубопровода на основе ограниченной исходной информации, получаемой в ходе технического мониторинга, требует привлечения аппарата теории некорректных задач (методов регуляризации). Методология теории некорректных задач, в отличие от распространенных численных методов обработки измерений, позволяет получать устойчивые и обладающие достаточной информативностью результаты при ограниченной исходной информации.

Разработка методов идентификации механического состояния трубопроводов с применением аппарата теории некорректных задач является перспективным направлением для создания методик натурных обследований и программного обеспечения систем технического мониторинга. При этом в настоящее время делается акцент на разработке методов, не требующих больших объемов входных данных и не накладывающих жестких ограничений на их точность.

Оценка технического состояния трубопроводов

Разработка прогностических методов в целях определения остаточного ресурса оборудования приобретает в последние годы все большую актуальность. В отличие от многочисленных методов, доступных для диагноза, прогнозирование все еще находится в развивающемся состоянии.

В зависимости от того, на чём основана методика прогнозирования, они делятся на:

-методики, основанные на статистической обработке полученных данных;

-методики, основанные на использовании моделей, в том числе физической;

-комплексные методики, сочетающие обе упомянутые.

Методами на основе статистической обработки являются регрессионный анализ, генетические алгоритмы, нейронные сети [2], нечеткая логика и другие.

Физические модели применяются для создания детерминированных связей между заданными критериями и данными от датчиков. Как правило, они сложны в построении, трудоемки и являются четко ориентированными, они не могут быть применены к другим участкам трубопровода.

Заключение

Применение существующих методов дефектоскопии металла при оценке ресурса малоэффективно. Поэтому необходим переход от традиционной дефектоскопии к технической диагностике с использованием принципиально новых подходов и методов контроля. К таким методам, прежде всего, следует отнести методы, позволяющие контролировать напряженно-деформированное состояние.

Располагая информацией, полученной в результате мониторинга напряженно-деформированного состояния линейной части магистрального трубопровода, и восстановленной картиной НДС трехмерной конструкции, можно определить участки с предаварийной ситуацией, в том числе до появления дефектов.

Диагностика состояния трубопровода по сравнению с дефектоскопией, требует применения более сложных методов обработки массивов информации для эффективной оценки технического состояния объекта. Современное развитие и возможности внедрения в прикладные задачи нейронных сетей заслуживают внимания в области оценки технического состояния объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Венгринович, В. Л.** Мониторинг технического состояния и оценка остаточного ресурса больших сооружений / В. Л. Венгринович, С. В. Клименко, С. И. Ротков, В. Н. Рябцев, А. Н. Прудников // В мире неразрушающего контроля. – 2015. – Том 18, №3. – С.42-46.

2 **Прокопенко, Е. Н.** Применение нейронных сетей при технической диагностике / Е. Н. Прокопенко, С. А. Прокопенко, А. Н. Прудников // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – С.308-309.

Контакты:

prudnikov_ran@mail.ru (Прудников Андрей Николаевич)