

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

А. Ю. БОНДАРЕНКО

Рассмотрены проблемы мониторинга сварных соединений магистральных нефтегазопроводов (МНГП). Показана возможность прогнозирования остаточного ресурса особо ответственных сварных конструкций коэрцитометрическим магнитным методом совместно с традиционными методами НК.

The paper deals with the problems of monitoring the welded joints in line oil and gas pipelines (LOGP). Possibility is demonstrated of forecasting the residual life of super critical welded structures by the coercimetric magnetic method in combination with the traditional NDT methods.

Важной проблемой при эксплуатации МНГП является оценка процессов старения (деградации) металла и сварных соединений. Недостаточный учет этого фактора ведет к большим материальным и финансовым потерям, а также непоправимым последствиям для окружающей среды. При развитой сети магистрального транспорта нефти и газа аварийность эксплуатируемых трубопроводов может вызвать серьезные кризисные явления в экономике.

Современный и перспективный способ оценки состояния сварных соединений МНГП по их фактическому техническому состоянию на практике реализуется путем создания системы мониторинга. Мониторинг — это сбор и анализ данных испытаний, выполненных путем контроля (измерений) по определенному методу или плану (регламентирующих правил) с целью управления системой и

получения свидетельств о качестве работы (эксплуатации) сварных конструкций.

Определение процессов старения дорогостоящих газонефтетранспортных систем, обеспечение их безопасности требует применения существующих методов и оборудования, а также разработки качественно нового подхода — использования технологий и методов системного анализа, процедур принятия решений для эффективного планирования технического обслуживания с целью выявления неисправностей и дефектов при эксплуатации конструкций и планомерной организации замены составных элементов МНГП (рис. 1).

Недостаток материальных и финансовых ресурсов приводит к необходимости проведения анализа проблемы определения остаточного технического ресурса, обеспечения безопасности систем с целью выявления возможных резервов технического и ор-



Рис. 1. Схема взаимосвязей различных функциональных задач, вносящих наибольший вклад в обеспечение безопасности МНГП

ганизационного плана, анализа и совершенствования подходов и планирования при продлении ресурсов элементов систем МНГП.

Основная идея использования существующих резервов состоит в том, чтобы при оценке технического состояния нефтегазотранспортных систем, планировании восстановления и ремонта элементов системы использовать дополнительную оценку состояния отдельных элементов сварного узла системы способом структуроскопии сварных швов и металла нефтегазопроводов.

Для принятия решений важно, чтобы при анализе использовать не только результат наблюдения и оценки текущего технического состояния, но и прогнозировать, как это состояние изменится в будущем. Выполнение указанных задач можно объединить в рамках понятия технического сопровождения эксплуатации сварных конструкций МНГП.

Проблема продления ресурса стареющих систем с учетом критерия безопасности является комплексной и состоит в проведении ряда этапов. На рис. 1 представлена схема взаимосвязей различных функциональных задач, которые вносят наибольший вклад в обеспечение безопасности сложных объектов.

Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса относится к находящемуся в эксплуатации техническому объекту — сварным газопроводам. Основой для прогнозирования служит информация, которую условно можно разделить на три части [1].

1. *Данные текущего (оперативного) контроля в процессе эксплуатации.* Контроль может быть непрерывным или дискретным (например, приуроченным к плановым профилактическим мероприятиям). Для поиска дефектов используются встроенные и внешние приборы, системы для хранения и переработки диагностической информации, алгоритмы и программы для принятия решений [2].

2. *Данные о нагрузках и других условиях взаимодействия объекта с окружающей средой* [3–5].

3. *Данные о материалах, элементах, узлах, нагрузках и т. п.*, то есть информация, лежащая в основе прогнозирования ресурса и оценки пока-

зателей надежности на стадии проектирования сварной конструкции.

Таким образом, три источника информации — диагностические данные о состоянии объекта, данные о старении материала и истории нагружения объекта — оказываются тесно связанными, взаимозависимыми и являются основой оценки качества работы МНГП.

В реальной практике оценка состояния трубопроводов базируется преимущественно на информации о дефектности используемого в них металла и сварных соединений. При этом данные о структурном состоянии конструкции по ряду причин не учитываются. Однако при эксплуатации нефтегазопроводов материаловедческие аспекты состояния металла должны быть преобладающими, так как дефекты, возникающие на почве структурной деградации, невозможно выявить из-за их лавинообразного роста и следующего за этим практически мгновенного разрушения трубопроводов.

Так, например, изменение свойств в процессе деформационного старения сварных трубопроводов после длительной эксплуатации характеризуется не только временем, а и величиной предварительной пластической деформации [6] при производстве и монтаже трубопроводов.

Максимальные искажения формы поперечного сечения трубной заготовки наблюдаются (рис. 2) на концевых участках (так называемый концевой эффект). Характерно, что значительное количество разрушений при испытаниях и эксплуатации трубопроводов зарождается именно в этих местах. Наименее контролируемы значения возможных пластических деформаций в монтажных условиях. При эксплуатации трубопроводов пластические деформации (их уровень зависит от ряда факторов) могут возникать также в зоне механических повреждений и коррозионных дефектов, в гibaх и на других участках деформирования металла трубопровода [7].

В металле швов сварных соединений могут быть технологические макродефекты сварки (несплошности, газовые поры, шлаковые включения, непровары), размеры и количество которых регламентированы НД. Наличие технологических дефектов

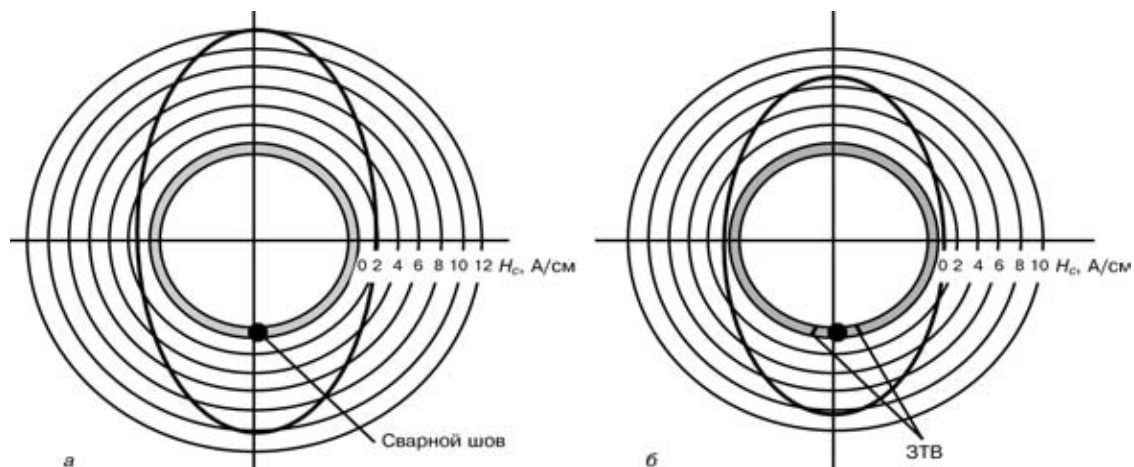


Рис. 2. Характер распределения коэффцитивной силы H_c на расстоянии 20 мм от торца эталонной одношовной сварной трубы (производства фирмы «Маннесман»), измеренной по окружности трубы (а) и вдоль образующей трубы (б) (ЗТВ — зона термического влияния)

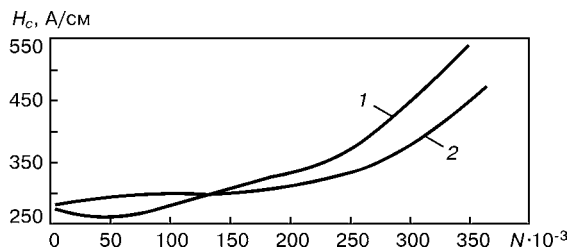


Рис. 3. Зависимость коэрцитивной силы H_c от количества циклов нагружения N для образцов из стали 09Г2С при многоциклового усталости: 1 — при измерении в направлении 90° , 2 — в направлении 0°

создает условия для появления дополнительных локальных концентраций напряжений в сварных соединениях. Поэтому при прогнозировании остаточного ресурса сварных соединений МНГП целесообразно в рамках системы мониторинга использовать данные о структурном состоянии и макродефектах сварки.

С учетом сказанного выше проведены исследования с целью разработки методики оценки изменений служебных характеристик трубных сталей и сварных соединений в процессе эксплуатации для прогнозирования остаточного ресурса.

Для испытаний напряженно-деформированного состояния и усталости материала исследуемых сварных металлоконструкций был применен магнитный метод [8–11]. Исследования выполнены на образцах из трубной стали 09Г2С с использованием коэрцитиметрического метода.

Применение накладного датчика позволило оперативно измерять коэрцитивную силу H_c в различных направлениях по отношению к сварному соединению и направлению приложения нагрузки. Измерение коэрцитивной силы H_c образцов было проведено в направлениях 0° и 90° по отношению к направлению прикладываемой нагрузки. Одновременно записывали диаграмму нагружения и фиксировали начало пластического течения материала сварного образца [5, 10, 11].

Анализ полученных результатов исследований показал, что в области упругих деформаций наибольшей чувствительностью при определении растягивающих напряжений обладает способ, при котором коэрцитивная сила измеряется в направлении 90° . В направлении приложения нагрузки (0°) для всех образцов наблюдается минимум зависимости $H_c(\sigma)$, где σ — напряжение внешнего воздействия.

При этом отмечено, что увеличение σ в зоне временного упрочнения металла приводит к росту H_c по обоим направлениям. Скачок значения H_c , наблюдаемый на графических зависимостях [5], соответствует состоянию текучести металла образца, т. е. достижению предела текучести σ_T стали сварной трубы [5].

Моделирование процесса накопления повреждений и пластической деформации материала при циклическом нагружении проводили на аналогичных образцах из стали 09Г2С. Испытания выполняли при отнулевом цикле нагружения с частотой 5 Гц в режиме многоциклового усталости [5]. Характерная зависимость коэрцитивной силы H_c от

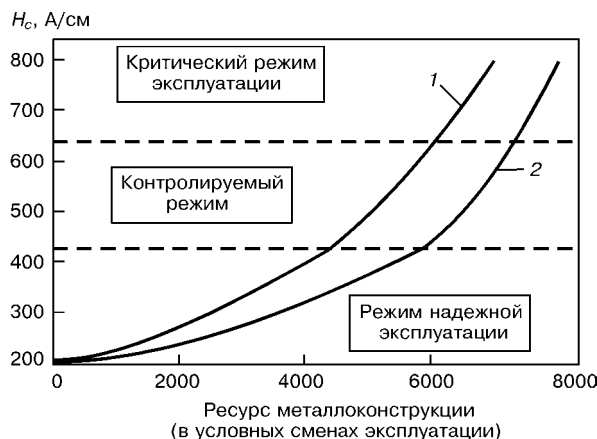


Рис. 4. Форма номограммы для оценки остаточного ресурса магистрального трубопровода по результатам мониторинга при разных режимах (1, 2) нагружений

количества циклов N при усталостном нагружении представлена на рис. 3.

Таким образом, выявлена зависимость коэрцитивной силы при статическом и циклическом нагружении от параметров нагружения образцов сварных соединений из стали, применяемых для производства труб МНГП [5, 11].

При этом были определены пороговые значения H_c для зоны сварного шва [11], а также области основного металла, по достижении которых в металле начинают накапливаться необратимые изменения [11]. Эта информация является основой при прогнозировании эксплуатационного ресурса сварных конструкций с позиций анализа структурного состояния, а в комплексе с данными НК существенно улучшает качество и достоверность оценки состояния и остаточного ресурса трубопроводов. Такой подход необходим в связи с тем, что сварные соединения в процессе эксплуатации подвергаются воздействию сложных статических и циклических нагрузок: весовых, компенсационных от тепловых расширений, нагрузок от внутреннего давления, цикличности рабочих параметров (давления, температуры) и воздействия коррозионной среды. При этом дополнительными и неучтенными могут быть нагрузки, вызванные нарушением расчетного состояния опорно-подвесной системы, заземлением отдельных участков трубопровода, неудовлетворительной работой дренажных систем участков и запорно-регулирующей арматуры со сроком службы более 20–25 лет.

В местах измерения величины H_c необходимо также дополнительно контролировать степень коррозии и эрозии металла с помощью толщиномеров, так как толщина стенки трубы также влияет на остаточный ресурс.

При проведении мониторинга состояния трубопроводов, включающего определение накопления повреждений и остаточных деформаций в местах с повышенными уровнями напряжений в процессе эксплуатации, используют статистический сравнительный анализ роста значения коэрцитивной силы H_c (по сравнению с исходным состоянием) в зонах наибольшей концентрации напряжений.

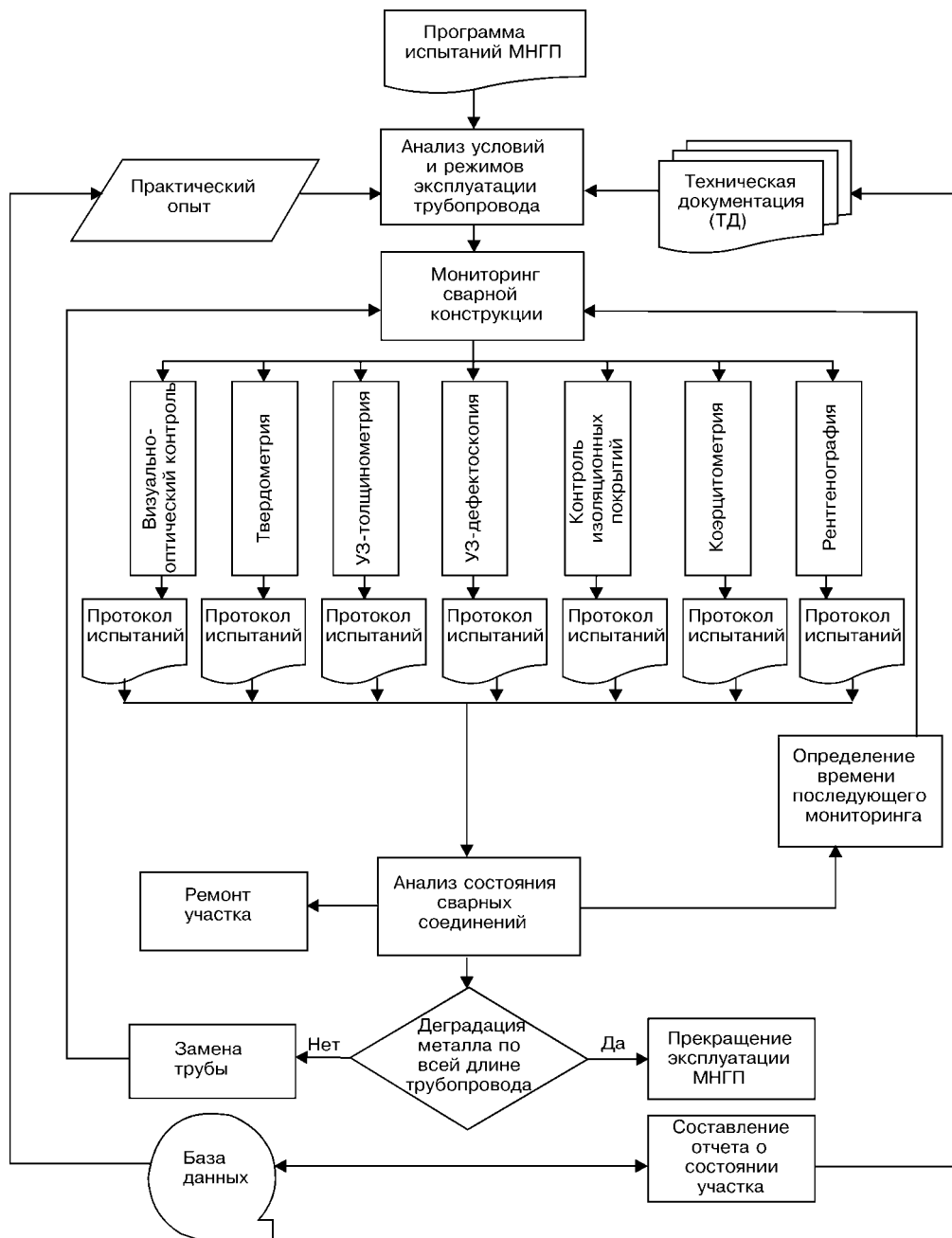


Рис. 5. Последовательность выполнения мониторинга при определении технического состояния сварных соединений МНГП

Статистический анализ на основе *генерального* распределения $H_c(L)$ в сечениях позволяет устанавливать средние напряжения по длине L трубы в долевом и поперечном направлениях. Сравнительный анализ средних значений H_{cx} и H_{cy} с исходными H_{cx_0} и H_{cy_0} позволяет выявить изменения $\Delta H_{c_1} = H_{cx} - H_{cx_0}$ и $\Delta H_{c_2} = H_{cy} - H_{cy_0}$. Они определяют *средние напряжения* в трубопроводе и общий уровень накопления повреждений и деформаций.

На основании полученных данных и анализа степени коррозии металла можно дополнительно к стандартным методам контроля дать общую оценку состояния трубопровода (рис. 4). Статистический анализ по схеме малых выборок (с помощью критерия Стьюдента), проведенный в зонах вблизи

сварных швов, дает оценку напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных участков трубопровода, а в сочетании с НК (рис. 5) позволяет сделать заключение об остаточном ресурсе трубопровода.

ВЫВОДЫ

1. Стендовые разрушающие статические и циклические исследования образцов сварных соединений трубной стали, проведенные совместно с параллельным коэрцитиметрическим методом, подтвердили эффективность разработанной методики. Информационный параметр – коэрцитивная сила – в процессе «продвижения» металла от исходного состояния поставки до момента разрушения изменяется в зависимости от особенностей этого состояния. Установлены характерные значения величин

ны H_c при нагрузках, соответствующих пределам текучести и прочности.

2. Процессами, предшествующими эксплуатационному повреждению сварных соединений, являются изменения свойств и микроструктуры металла в зонах концентрации напряжений (металла шва, зоны термического влияния, основного металла). Соответственно происходит изменение намагниченности металла, отражающей напряженно-деформированное состояние сварных соединений.

3. Три источника информации — диагностические данные о состоянии объекта, данные о старении материала, полученные магнитным методом, и об истории нагружения объекта — необходимы для достоверного определения остаточного ресурса сварных соединений МНПП.

4. Используя предложенный подход, можно прогнозировать остаточный ресурс непосредственно по результатам контроля магнитным методом значений коэрцитивной силы. Это позволяет рекомендовать данный метод как дополнительный к применяемым неразрушающим методам обнаружения макродефектов при анализе, прогнозировании и принятии решения об остаточном ресурсе сварных соединений при мониторинге, проводимом для обеспечения качества эксплуатации МНПП.

5. В качестве одного из путей решения проблемы информационной поддержки жизненного цикла сварных газопроводов на всех его стадиях может быть рекомендовано применение CALS-технологий (информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий).

1. *Болотин В. В.* Ресурс машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
2. *Бондаренко А. Ю.* Прогнозирование ресурса ответственных сварных конструкций на стадии эксплуатации // Тез.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

стэнд. докл. Междунар. конф. «Сварные конструкции» (Киев, октябрь 2000 г.) / НАН Украины. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. — Киев, 2000. — С. 71.

3. *О старении* и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
4. *Стеклов О. И.* Мониторинг и прогноз ресурса сварных конструкций с учетом их старения и коррозии // Сварка и родственные технологии — в XXI век: Сб. тр. Междунар. конф. (Киев, ноябрь 1998 г.). — Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, 1998. — С. 257–261.
5. *Бондаренко А. Ю.* Об оценке усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающим магнитным методом для обеспечения качества сварных конструкций, изделий и материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2002. — № 2. — С. 42–45.
6. *Гиренко В. С., Семенов С. Е., Гончаренко Л. В.* Деформационное старение трубных сталей // Там же. — 2001. — № 3. — С. 32–35.
7. *Иванцов О. М.* Надежность и экологическая безопасность магистральных трубопроводов России // Сварка и родственные технологии — в XXI век: Сб. тр. Междунар. конф. (Киев, ноябрь 1998 г.). — Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, 1998. — С. 99–109.
8. *Клюев В. В.* Неразрушающий контроль и диагностика безопасности // Зав. лаборатория. Диагностика материалов. — 1996. — № 1. — С. 16.
9. *Boeing Kn. G.* NDE handbook. NDT examination methods for condition monitoring. Teknisk Forland A/S. — Danish Technical Press, 1987–1989. — 418 p.
10. *Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К.* Оценка остаточного ресурса сварных соединений магнитным методом для мониторинга сварных конструкций // Материалы МИС. Дос. V-1225-2002.
11. *Об оценке* усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающим магнитным методом. Материаловедческие аспекты / В. Ф. Мужикский, Ю. К. Бондаренко, А. Ю. Бондаренко, Г. Я. Безлюдько // Матер. 3-й Междунар. конф. «Диагностика трубопроводов», Москва, 21–26 мая 2001 г. — М., 2001. — С. 11.

Поступила в редакцию 26.11.2002