

УДК 621.785:622.691.4:004.9

Цифровой двойник магистрального газопровода для оценки работоспособности сварных соединений

Зорин Андрей Алексеевич^{1(*)}

andreyzorin74@gmail.com

Рыбин Олег Александрович¹

oleg_rybin65@mail.ru

SPIN-код: 9877-9784

Воронов Владимир Александрович²

voronov_va@voenmeh.ru

SPIN-код: 2862-6609

¹ ООО «Константа», Санкт-Петербург, Россия² БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлена концепция цифрового двойника объектов магистрального газопровода, включающего атрибуты сварных стыковых соединений и привязку дефектов. Модель обеспечивает интеграцию паспортных данных объекта, результатов диагностики сварных соединений и расчетных процедур оценки прочности и работоспособности. В соответствии с СТО Газпром 2-2.4-715-2013, представлен алгоритм многоуровневой оценки работоспособности кольцевых сварных соединений с использованием двухпараметрических критериев прочности. Продемонстрировано, как замкнутый контур «паспорт – диагностика – расчет – решение» реализуется в программном комплексе: от формирования информационной модели с данными сварных швов до генерации отчета по результатам анализа. Практическое применение такого цифрового контура позволяет ускорить принятие решений по ремонту и продлению ресурса объектов, повысить достоверность заключений об их промышленной безопасности.

Ключевые слова: магистральный газопровод, сварное соединение, цифровой двойник, диагностика, прочностной расчет, остаточный ресурс, методика оценки работоспособности

Введение. В современных условиях эксплуатации магистральных газопроводов особое внимание уделяется надежности сварных стыковых соединений. Накопленный опыт подтвердил необходимость комплексной оценки их технического состояния с учетом нормативных требований СТО Газпром 2-2.4-715-2013 «Методика оценки работоспособности кольцевых сварных соединений МГ» [1] и интеграции результатов различных обследований. Цифровизация позволяет сформировать единую информационную среду (цифровой контур) [2] для сбора данных, анализа и принятия решений. Целью настоящей работы является разработка и апробация цифровой модели (двойника) магистрального газопровода, учитывающей сварные соединения, диагностику дефектов и расчет ресурса по требованиям СТО 2-2.4-715-2013.

Методы и материалы; результаты. В рамках проекта ReSOURCE реализована иерархическая цифровая модель объектов магистрального газопровода, укрупненно включающая уровни: «объект — элемент — сварное соединение — дефект».

Для каждого кольцевого сварного соединения в цифровом двойнике формируются следующие группы атрибутов:

- геометрические параметры (диаметр, толщина стенки, смещение кромок, высота усиления шва);
- характеристики материала основного металла и металла шва (предел текучести, предел прочности, ударная вязкость, параметры диаграммы деформирования);
- эксплуатационные параметры (давление, температурный перепад, продольные напряжения);
- результаты неразрушающего контроля (тип дефекта, глубина, длина, ориентация, координаты) [3];
- история диагностирования и ремонта.

Результаты ультразвуковой, радиографической и других видов дефектоскопии загружаются в систему с привязкой к конкретному сварному соединению и временной метке обследования.

Расчет работоспособности выполняется в соответствии с СТО Газпром 2-2.4-715–2013 и включает следующие основные этапы.

1. Определение расчетных напряжений. Формируются номинальные кольцевые и продольные напряжения от внутреннего давления, дополнительные продольные напряжения от температурного перепада и изгиба, а также учитываются остаточные сварные напряжения.

2. Аппроксимация диаграммы деформирования. Диаграмма «напряжение — деформация» аппроксимируется моделью Рамберга — Осгуда [4], что позволяет учитывать упругопластическое поведение металла в зоне дефекта.

3. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Для поверхностных и внутренних трещиноподобных дефектов определяется коэффициент интенсивности напряжений с учетом геометрии дефекта и действующих напряжений [4].

4. Построение диаграммы «целостность — разрушение». Работоспособность оценивается по совокупности критериев пластичности и трещиностойкости с использованием диаграммы предельного состояния. Проверяется выполнение условий.

5. Определение коэффициентов запаса. Рассчитываются частные и интегральные коэффициенты запаса по пластичности и трещиностойкости. По их значениям определяется категория технического состояния сварного соединения.

Все этапы расчета реализованы в модуле оценки сварных соединений платформы ReSOURCE. Алгоритмы расчета связаны с цифровой моделью объекта, что исключает ручное дублирование данных и обеспечивает прослеживаемость исходных параметров. По результатам вычислений система автоматически формирует структурированный отчет.

Таким образом, диагностика, расчет и документирование объединены в единый цифровой контур.

Практическое применение подхода показало снижение доли ручных операций при подготовке заключений и повышение воспроизводимости расчетов при повторных обследованиях.

Заключение. Создание цифрового двойника линейной части магистральных газопроводов с детализированной моделью кольцевых сварных соединений позволяет перейти от фрагментарной оценки дефектов к системному анализу их работоспособности.

Интеграция методики СТО Газпром 2-2.4-715–2013 в программную среду обеспечивает формализацию расчетных процедур, прослеживаемость инженерных решений и формирование единого отчетного документа, обосновывающего возможность дальнейшей эксплуатации.

Предложенный подход способствует повышению уровня промышленной безопасности, снижению субъективного фактора при интерпретации результатов диагностики и созданию основы для дальнейшего развития интеллектуальных методов анализа сварных соединений магистральных газопроводов.

Список источников

- [1] СТО Газпром 2-2.4-715–2013. *Методика оценки работоспособности кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов*. Москва, ОАО «Газпром», 2013.
- [2] Исмаилова В.Р., Бортникова Л.А. Цифровые инструменты в диагностике и ремонте газопроводов. *Вектор научной мысли*, 2025, № 4 (21).
- [3] СТО Газпром 2-2.2-136–2007. *Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов. Часть I*. Москва, ОАО «Газпром», 2007.
- [4] Писаренко Г.С., Лебедев А.А. *Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности*. Москва, Наука, 1988.