

занными трендами, но и направлены на их исполнение различными общественными, коммерческими и государственными структурами. Реализация положений плана включает следующие направления:

- совершенствование механизмов логистики и управления цепями поставок;
- совершенствование таможенного администрирования перемещения транспортных средств и грузов;
- развитие международного сотрудничества, проведение исследований международных и национальных логистических систем и грузопотоков;
- повышение эффективности функционирования логистических центров.

Наиболее действенным и перспективным вариантом по модернизации пунктов пропуска как элемента повышения эффективности грузопотоков является реализация мероприятий в области информатизации и цифровизации, предусмотренных Государственной программой «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы (далее – Государственная программа), утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 02.02.2021 г. № 66.

Государственной программой предусмотрено развитие компонентов Единой автоматизированной информационной системы таможенных органов (далее – ЕАИС ТО). Данным мероприятием на период до 2023 года предполагается провести модернизацию автоматизированной подсистемы «Транзит таможенного союза», автоматизированной подсистемы «Модуль автоматической рассылки сообщений», а также модернизацию системы защиты информации ЕАИС ТО. К 2024 году Государственной программой предусмотрено создание интеллектуальной платформы комплексного управления и мониторинга обстановки на государственной границе.

УДК 539.42

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКВОЗНЫХ ОСЕВЫХ ДЕФЕКТОВ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТРУБОПРОВОДОВ

М. В. ГОРОХОВА

*Филиал Самарского государственного университета путей сообщения,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация*

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию технического состояния магистральных нефтепроводов методами внутритрубной диагностики (ультразвуковой и магнитный методы контроля). По результатам таких исследований удается выявить дефекты трубопроводов, которые приводят к снижению прочности отдельных участков трубопроводов и, как следствие, надежности всего трубопровода. Поэтому актуальным является определения разрушающего давления для участков магистральных трубопроводов, которые содержат различные дефекты, выявленные по результатам внутритрубной диагностики.

За время своей эксплуатации любой трубопровод испытывает как статическое, так и циклическое нагружение, что необходимо учитывать при выборе критерия предельного состояния, принимаемого для оценки прочности. Наиболее перспективным здесь является деформационный критерий, который можно использовать для различных состояний материала, а также широкой области размеров трещин. Но вместе с тем применение этого критерия к оценке прочности труб магистральных нефтепроводов с трещиноподобными дефектами в настоящее время не представляется возможным ввиду отсутствия необходимой экспериментальной информации по критическим коэффициентам интенсивности деформаций и отсутствия решения для коэффициентов интенсивности напряжений в относительно длинных несквозных трещинах в цилиндрических тонкостенных оболочках. Применение критериев линейной механики также не представляется возможным, так как хрупкое разрушение труб магистральных трубопроводов, с учетом характеристик трубных сталей и толщин стенок, может реализовываться только при температурах ниже температуры вязко-хрупкого перехода материала (от -40 до -10 °С), что ниже минимальных температур, которые зафиксированы при перекачке нефти.

Поэтому на основе экспериментальных исследований было принято, что критический размер трещин определяется на основе критерия образования пластического шарнира в ослабленном сечении. Разрушение вследствие образования пластического шарнира предполагает, что разрушение в ослабленном сечении является упругопластическим до возникновения какого бы то ни было рас-

пространения трещины. Предполагается, что разрушение происходит при критическом напряжении в ослабленном сечении, которое считают свойством материала.

В данном исследовании в качестве критического напряжения принимается

$$\sigma_f = \frac{\sigma_b}{A},$$

где σ_b – предел прочности материала трубы; A – эмпирический коэффициент, учитывающий местоположение трещиноподобного дефекта.

Для трещиноподобных дефектов, расположенных вне зоны сварного шва – $A = 1,15$, что соответствует данным по разрушению бездефектных труб вне зоны сварных соединений.

В исследовании разрабатывались методики расчета произвольно ориентированных дефектов стенки трубы. Поскольку крайними случаями ориентации дефекта являются продольные и окружные дефекты, то на первом этапе исследования определялась возможность приведения расчетных формул для этих дефектов к одному виду. В качестве расчетных моделей для оценки опасности окружных дефектов предлагается использовать модель Ранганата [1], определяющую зависимость между нагрузкой (внутреннее давление и изгиб трубы) и размером дефекта, а также модель Даффи и Эйбера [2], предложенную для несквозных продольных дефектов в трубах, нагруженных внутренним давлением.

Рассмотрим особенности расчета прочности трубы со сквозными осевыми дефектами. Эмпирическое выражение для разрушающего окружного напряжения для данного вида дефекта было получено Эйбером в виде

$$\sigma_h = \frac{\sigma_f}{M}, \quad (1)$$

Коэффициент M рассчитывается по формуле

$$M = \left[1 + \left(\frac{1,61}{Rt} \right) \cdot l^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где R – номинальный радиус трубы; t – толщина трубы; l – полудлина трещины.

Значение коэффициента M можно также вычислять по уточненным решениям, которые были получены Фолиасом и Кефнером [3]. Все эти зависимости являются аппроксимациями поправочной функции коэффициентов интенсивности напряжений для точного упругого решения [6] и соответствуют отношению номинальных разрушающих напряжений для бездефектной трубы к их номинальному напряжению для трубы со сквозным дефектом той же длины.

Анализ полученных результатов показал, что точность расчета разрушающего давления зависит от правильного выбора критического напряжения, который определяется коэффициентом λ размера трещины $\left(\lambda = \frac{l}{\sqrt{Rt}} \right)$.

Так, при больших длинах трещины ($\lambda > 3$) предпочтительнее использовать в качестве критического напряжения временное сопротивление материала $\sigma_f = \sigma_b$. При средних значениях длин трещин ($1,5 < \lambda < 3$) и неглубоких коротких трещинах ($\lambda < 1,5$) в качестве критического напряжения приемлемо использовать выражение $\sigma_f = \frac{\sigma_b + \sigma_{02}}{2}$. Для коротких ($\lambda < 1,5$) глубоких трещин последнее выражение для критического напряжения снова дает чрезмерно консервативный результат. Поэтому для них в качестве критического напряжения необходимо использовать напряжение близкое к пределу прочности $\sigma_f = \sigma_b$. Очевидно, это связано как с возникновением объемного напряженного состояния в вершине трещины при уменьшении ее относительной длины и увеличении глубины, приводящего к снижению уровня предельных пластических деформаций в ослабленном сечении, так и с увеличением погрешности в расчетах коротких и глубоких трещин.

В связи с этим при использовании в расчете постоянного значения критического напряжения предпочтительнее использование коэффициента M по зависимости (2) как снижающего консервативность расчета для коротких глубоких трещин, так и сохраняющего консервативность для длинных трещин, являющихся наиболее опасными с точки зрения последствий разрушения.

Список литературы

- 1 Raganat, S. Engineering methods for assessment of ductile fracture margin in nuclear power plant piping / S. Raganat // Elastic Plastic Fracture Second Symposium. – Vol. 2. Fracture Resistance Curves and Engineering Applications // ASTM STP 803, American Society for Testing and Materials. – Philadelphia, Pa., 1983.
- 2 Практические примеры расчета на сопротивление хрупкому разрушению трубопроводов под давлением. Разрушение. Т. 5. / А. Р. Даффи [и др.]. – М. : Машиностроение, 1977. – 452 с.
- 3 Мураками, Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Ю. Мураками. – М. : Мир, 1990. – 448 с.

УДК 160.178.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГИБЕ

М. В. ГОРОХОВА, С. В. СОЗИНОВ

Волжский государственный университет водного транспорта, Российская Федерация

Корпус любого водоизмещающего судна во время его эксплуатации подвержен воздействию усилий, величина и направление действия которых непрерывно изменяются. Связи судового корпуса испытывают одновременно несколько видов деформаций. Кроме этого, прочность связей судового корпуса изменяется во времени из-за износа и появления пластических деформаций. В результате в районе концентраторов напряжений, которыми являются сварные швы, вырезы, прерывистые связи и жесткие точки зарождаются усталостные трещины. При этом по судостроительным сталям, работающим в составе корпусных конструкций в условиях сложного напряженного состояния, практически нет исследований по оценке влияния степени и вида деформации на параметры усталостного разрушения. Поэтому целью исследований было прогнозирование долговечности, снижение металлоемкости судокорпусных изделий на основании изменения механических характеристик и закономерностей усталостного разрушения предварительно деформированных материалов.

Образцы для проведения исследований изготавливались из гнутых замкнутых сварных профилей стали 15 размером 80×80×3 мм (ГОСТ 30245–2003) При этом предварительной пластической деформации в диапазоне от 0 до 18 % подвергались пластины с размером поперечного сечения 3×20 мм, из которых затем изготавливались образцы как для статических испытаний растяжением (сечением 3×3 мм), так и для усталостных испытаний. Для получения практически идентичных образцов и уменьшения разброса экспериментальных данных образцы изготавливались из профилей одной партии. Статические испытания и предварительное деформирование растяжением проводились при комнатной температуре на разрывной машине ИР5057-50, оснащенной компьютерной приставкой, со скоростью деформации 10^{-3} с^{-1} . По результатам статических испытаний помимо стандартных механических характеристик (σ_b – предел прочности; σ_{02} – предел текучести; δ – полное относительное удлинение) определялся показатель деформационного упрочнения n из уравнения кривой упрочнения при статическом растяжении [1]:

$$\sigma_i = \sigma_0 \varepsilon_i^n,$$

где σ_i – истинное текущее напряжение течения; σ_0 – постоянная, равная напряжению течения при $\varepsilon = 1$; ε_i^n – истинная текущая деформация.

Величины механических характеристик оценивались по результатам испытаний 4–5 образцов. Линейные размеры образцов замерялись на компараторе ИЗА2-С с точностью до 0,001 мм. Относительная погрешность исследуемых величин не превышала 1,6 %. По результатам исследований установлены закономерности изменения механических характеристик от степени предварительной деформации растяжения.

Испытания на усталость проводились на знакопеременный симметричный циклический изгиб по схеме «мягкого» нагружения, когда при динамическом возбуждении заданной величиной является напряжение практически постоянное на всем протяжении испытания, а перемещение образца кинематически неограничено и может изменяться в зависимости от изменения жесткости нагружаемой системы в период нарастания усталостных повреждений и постепенного развития усталостной трещины.