

контакта и ряд других характеристик. Индентирование образцов проводилось в 10 точках с постоянной скоростью 0,05 мН/с до достижения заданной максимальной нагрузки 10 мН. Теоретические расчеты выполнялись с помощью программного обеспечения на основе модели Оливера – Фарра.

Выработаны рекомендации по практическому использованию изучаемых покрытий для придания различным металлическим изделиям промышленного назначения повышенной прочности, износостойкости и долговечности. Выявлено влияние красящих пигментов (химический состав) на исследуемые характеристики образцов с покрытиями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-01-00517).

УДК 622.692.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ДЕФЕКТНОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

М. В. ГОРОХОВА

*Нижегородский филиал Самарского государственного университета путей сообщения,
Российская Федерация*

В настоящее время в производстве труб для магистральных трубопроводов произошли большие изменения. Наряду с разработкой и созданием труб из перспективных марок стали с пониженным содержанием серы и фосфора продолжают использоваться трубы из традиционных марок стали, изготовленные по улучшенным технологиям. К таким в первую очередь следует отнести прямошовные трубы, изготовленные с одним продольным швом для всех диаметров, и спиральношовные трубы, которые изготавливаются по улучшенным технологиям формирования сварного шва, условий термообработки и содержанию примеси в стали.

Были выполнены теоретическое и экспериментальное исследования по сравнению прочности и долговечности таких труб в условиях одновременного воздействия внутреннего давления и изгиба. Основная задача работы состояла именно в определении и сравнении прочности труб большого диаметра разной технологии изготовления на различных этапах разрушения в условиях повторно-статического нагружения внутренним давлением: инкубационного периода зарождения трещины; развития трещины до критических размеров; инициирование трещины с потерей герметичности трубы.

В рамках выполненного исследования проведена оценка условий разрушения сварных труб. Так как технические условия на производство сварных труб предполагают равнопрочность сварного шва и основного металла трубы, то при статическом испытании внутренним давлением справедливо предполагалось равновероятностное разрушение трубы по сварному шву и основному металлу. Практика испытаний сварных труб показывает, что действительно, при однократном нагружении разрушения труб происходят как по сварным швам, так и основному металлу. При этом разрушение спиральношовных труб по сварным швам практически отсутствуют, а по продольным швам случаи разрушения составляют около 40 % от испытаний.

В таблице 1 приведены данные по результатам испытания прямошовных труб.

Таблица 1 – Результаты испытаний сварных труб

№ п/п	Сечение трубы, мм	Марка стали	$R_{\text{разр}}$, кг/см ²	$\sigma_{\text{разр}}$, кг/мм ²	$\frac{\sigma_{\text{разр}}}{\sigma_{\text{нормат}}}$	Место разрыва относительно продольного шва
1	720×9	17ГС	140	55,3	1,06	В 30 мм от шва
2	720×9	17ГС	140	55,3	1,06	В 115 мм от шва
3	720×9	17ГС	158	62,5	1,20	В 215 мм от шва
4	720×9	17ГС	145	57,3	1,10	В 460 мм от шва
5	530×7,5	17ГС	125	43,6	0,84	По сварному шву
6	530×7,5	17ГС	132	46,0	0,88	Противопол. обр.
7	530×9	14ХГС	160	46,3	0,89	Противопол. обр.
8	530×9	14ХГС	158	45,6	0,88	Около шва
9	530×7	10Г2С1	135	50,5	0,97	Около шва
10	530×7	10Г2С1	135	50,5	0,97	Около шва

Разрушение трубы, содержащей зону конструктивной концентрации напряжений (сварной шов), реализуется либо за счет исчерпания пластичности в зоне концентрации напряжений, либо в мембранной зоне с образованием утонения в месте разрыва, аналогично случаю испытания стандартных образцов. Конкретно место образования разрыва зависит от уровня концентрации напряжений в сварном шве, вида напряженного состояния, сопротивления материала пластическому деформированию, пластичности материала.

Было проанализировано разрушение трубы вне сварного шва. В этом случае условием достижения предельного состояния трубы в мембранной зоне было принято равенство мембранных напряжений временному. В зоне разрушения наблюдалось характерное утонение стенки трубы, аналогичное образованию шейки при испытании стандартных образцов. Условием достижения предельного состояния трубы в зоне сварного шва является, согласно деформационному критерию прочности, достижение местной пластической деформации величины предельной пластичности материала, или, что аналогично, равенство местных напряжений истинному сопротивлению разрыву материала. При одинаковых значениях временного сопротивления основного металла трубы, металла шва и металла околошовной зоны разрушение сварной трубы при статических испытаниях внутренним давлением происходит при давлении меньшим рассчитываемому по теоретическим формулам.

Выполненные экспериментальные исследования и расчеты показали, что условием разрушения труб по сварному шву является превышения теоретического коэффициента концентрации напряжений. Так, для продольного шва условием разрушения трубы по сварному шву является превышение теоретического коэффициента концентрации значения $\alpha = 3,4$. Для спирального шва ($\beta = 60^\circ$) получено, что условием разрушения по сварному шву является превышение теоретического коэффициента концентрации значения $\alpha = 4,4$. Следует также отметить, что увеличение предельного коэффициента концентрации напряжений в сварном шве определяется, в основном, углом его наклона к оси трубы.

Проведенные ранее обследования сварных труб магистральных нефтепроводов показали, что для продольных швов характерны коэффициенты концентрации напряжений в диапазоне от 2 до 8, а для спиральных швов от 2 до 4. Различия в формировании швов и оценка возможных концентраторов напряжений требует отдельного детального рассмотрения.

Сравнительные испытания внутренним давлением с повышенной нагрузкой прямошовных и спиральношовных труб большого диаметра показали их высокие прочностные характеристики, соответствующие современным требованиям и не уступающие зарубежным аналогам. Вместе с тем различие в технологии их изготовления влияет на особенности реализации их эксплуатационной надёжности.

Выполненные экспериментальные и теоретические исследования показали, что разрушение сварных труб при статическом нагружении внутренним давлением у прямошовных труб возможно как по сварному шву, так и по основному металлу трубы в мембранной зоне, а разрушение спиральношовных труб реализуется исключительно по основному металлу трубы в мембранной зоне.

Кроме этого, при изготовлении прямошовных труб применяется процедура их правки в экспандере, что приводит к формированию дополнительного дефекта формы сварного шва – угловатости («домика»), а как следствие – увеличению уровня концентрации напряжений в сварном шве, снижению прочностного и усталостного ресурса трубы. Уровень исчерпания пластичности материала в зоне сварного шва при экспандировании недостаточен для снижения статической прочности труб, но оказывает влияние на усталостный ресурс трубы. Поэтому вопрос влияния технологии изготовления труб на уровень концентрации напряжений в сварном шве требует отдельного детального исследования. При этом предварительный анализ влияния технологии изготовления труб показал, что уровень концентрации напряжений в сварных швах прямошовных и спиральношовных труб примерно одинаков.

Однако выполненные исследования позволили сделать вывод о том, что прямошовные трубы имеют особое преимущество при их использовании на участках трубопроводов, подверженных повышенным изгибным и продольным нагрузкам (участки воздушных переходов, слабонесущие грунты, повышенные перепады температур и т. п.). Поэтому такие трубы могут применяться при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов по перекачке жидких и газообразных продуктов без ограничений.