

УДК 621.791

Повышение ресурса сварных муфт на основе компьютерного моделирования

Куркин А. С.¹, Королев С. А.¹,
Пономарев П. А.^{1,*}

[*pa.ponomarev@bmstu.ru](mailto:pa.ponomarev@bmstu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Выработка проектного ресурса магистральных нефтепроводов вызывает необходимость увеличения срока эксплуатации трубопроводов до 100 лет. Это объясняет актуальность развития ремонтных конструкций, обеспечивающих уровень ресурса после ремонта равный неповрежденной трубе. В работе представлены результаты параметрического исследования методов повышения ресурса ремонтных муфт для восстановления работоспособности нефтепровода. На основе анализа напряженного состояния под действием внешних нагрузок с помощью компьютерного моделирования предложен вариант конструкции муфт, обеспечивающей существенное повышение ресурса.

Ключевые слова: ресурс, сварная муфта, напряженное состояние, повышение ресурса, компьютерное моделирование

Введение

Одним из способов оперативного восстановления работоспособности магистральных нефтепроводов является установка ремонтных конструкций муфт и тройников. Применение ремонтных конструкций обеспечивает оперативность и ремонт без остановки перекачки, что значительно удешевляет стоимость восстановительных работ. На сегодняшний день в России более 40% магистральных нефтепроводов выработали нормативно-проектный срок эксплуатации, и существует реальная перспектива и потребность продления этого срока (вплоть до 100 лет) на основе регулярной оценки их технического состояния и устранения выявленных повреждений.

В связи с этим необходимы ремонтные конструкции, способные обеспечить повышенный ресурс нефтепроводов. Однако одна из наиболее универсальных ремонтных конструкций – разрезной тройник – имеет, в соответствии с нормативной документацией, срок службы не более 15 лет [1]. В работе [2] выявлены факторы, приводящие к снижению ресурса сварных ремонтных муфт. Их слабыми местами являются герметизирующие кольцевые угловые швы нахлесточных соединений муфты с магистральной трубой.

Все выявленные проблемы в конструкции и пути их решения можно разделить на две группы. Первая охватывает параметры формы и соотношения размеров элементов муфты, изготавливаемых в заводских условиях. Вторая включает наиболее сложные и непостоянные факторы, связанные с технологией сварки при монтаже в полевых условиях. Примерами весьма важных, но трудно регулируемых и контролируемых факторов, зависящих от условий ремонта, являются зазор между муфтой и трубой, а также острота непровара в корне шва. Комплекс процессов, протекающих при сварке и работе конструкции в зоне корня углового шва, достаточно сложен и подвержен влиянию большого числа случайных факторов требует экспериментальных исследований. Однако целый ряд факторов, связанных с конструктивным оформлением муфты, может быть более эффективно исследован на компьютерной конечноэлементной модели. Это позволяет дать обоснованные рекомендации по изменению конструкции и оценить эффективность этих изменений для повышения ее недостаточной циклической долговечности.

1. Способы повышения ресурса сварных разрезных муфт

Литературный обзор показывает, что можно выделить три основных направления в способах повышения ресурса. Первое связано с усилением ослабленного участка (углового шва) за счет увеличения сечения шва, второе - с усилением зоны сварного соединения дополнительными разгрузочными кольцами. Третье направление заключается в изменении типа соединения для снижения концентрации напряжения: переходе от нахлесточного соединения к тавровому или стыковому [3,4].

Повышения площади сечения шва можно достигнуть увеличением катетов шва, применением «обратной» разделки кромок, заполнением швом зазора между муфтой и разгрузочным кольцом. Разгрузочные кольца могут быть установлены как на трубу рядом с муфтой, так и поверх муфты, они предназначены для уменьшения взаимного поворота сечений трубы и муфты [2,5]. По третьему направлению предлагается использование нахлесточно-стыковых соединений [3,6], а также переход к торо-сегментной или торо-цилиндрической конструкциям муфты [4].

В данной работе рассмотрены первые два направления повышения несущей способности сварной муфты: усиление шва и применение разгрузочных колец. Эти параметры сравнительно просто регулировать и контролировать. Для выбора их рационального сочетания наилучшим инструментом являются параметрические исследования (численные эксперименты) на компьютерных моделях. Они позволяют оперативно проанализировать большое количество вариантов и убедиться, что предлагаемое решение действительно является наиболее рациональным как по достигаемому повышению долговечности, так и по простоте и экономичности его технического осуществления.

2. Численное параметрическое исследование сварного соединения муфты в условиях приемочных гидроиспытаний

2.1 Компьютерная модель

Анализ напряженного состояния зоны шва требует измельчения сетки конечных элементов для получения количественных результатов. Поскольку исследуемое явление – изгиб трубы на выходе из муфты – имеет осесимметричный характер, целесообразно провести расчеты на двумерной осесимметричной модели с мелкой сеткой у корня шва.

В модели принят постоянным радиус концентратора в корне шва (0,5 мм). Сетка элементов в прилегающей к корню шва зоне также была во всех вариантах расчетов одинаковой для облегчения сопоставления вариантов (рис. 1). В качестве базового для сопоставления был принят вариант муфты, устанавливаемой на трубу диаметром 1069 мм с толщиной стенки 20 мм, без разгрузочного кольца с катетами углового шва, равными толщине стенки муфты (26 мм), с минимальным зазором. Нагрузка - внутреннее давление 12,78 МПа.

Концентратор напряжения в корне шва представлен во всех моделях в виде окружности с постоянным радиусом 0,5 мм.

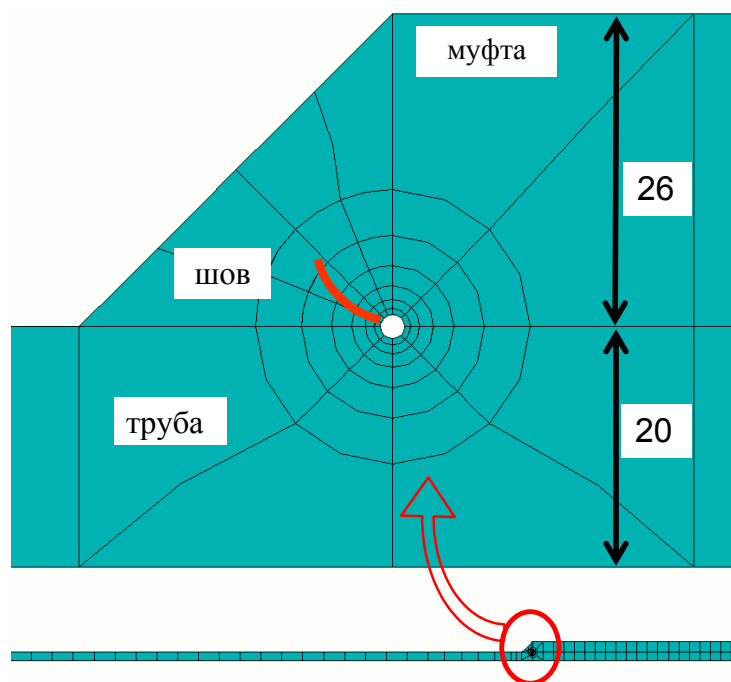


Рис. 1. Сетка конечных элементов осесимметричной модели базового варианта с примыкающим участком муфты (вверху – увеличен участок сетки в шве)

2.2 План параметрических исследований

Уравнение малоциклового усталости Мэнсона-Коффина показывает, что главным фактором циклического нагружения является амплитуда упруго-пластической деформации $\varepsilon_{пл}$ в опасной точке (в корне углового шва), и ее снижение в 2 раза приводит к повы-

шению долговечности в 4 раза. Согласно отраслевым нормам, в нефтепроводе ожидаемое число циклов нагружения за 30 лет службы составляет $N = 10000$ (в среднем раз в сутки возможен сброс давления до нуля). Это означает, что при пластичности стали (поперечном сужении ψ) на уровне 50 % возможно усталостное разрушение при пластической деформации за цикл ε_{nl} порядка 0,5 %.

Таким образом, для сопоставления вариантов конструкции муфты необходимо следить за уровнем пластической деформации в опасной точке. Результаты могут быть представлены в виде относительного изменения ожидаемой долговечности по сравнению с базовым вариантом

$$\frac{N}{N_{\bar{o}}} = \left(\frac{\varepsilon_{nl}}{\varepsilon_{nl.\bar{o}}} \right)^2, \quad (1)$$

где N , $N_{\bar{o}}$ – расчетный ресурс данного и базового вариантов конструкции муфты в циклах или годах, а ε_{nl} , $\varepsilon_{nl.\bar{o}}$ – пластическая деформация за цикл в концентраторах напряжения этих вариантов конструкции. Результаты могут быть также выражены в годах долговечности, если принять долговечность базового варианта равной 15 годам.

План параметрических исследований включает следующие этапы:

- расчеты по базовому варианту, определение пластической деформации в корне шва;
- анализ влияния катета углового шва;
- анализ влияния характера разделки и выпуклости углового шва;
- анализ влияния расположения разгрузочного кольца, кольцо толщиной 26 и шириной 200 мм размещается на различных расстояниях от шва;
- анализ влияния размеров разгрузочного кольца. Кольцо на постоянном расстоянии от шва (наилучшем по результатам этапа 3) толщиной 26 мм имеет различную ширину, затем рассматривается кольцо постоянной ширины с различной толщиной;
- анализ влияния ослабления сечения муфты и заварки зазора между муфтой и разгрузочным кольцом;
- анализ влияния увеличения зазора между муфтой и трубой сверх нормативного.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований должны обеспечить выбор рационального сочетания параметров конструкции и технологии ремонта с учетом сложности их обеспечения и достигаемого повышения долговечности.

3. Результаты параметрических исследований

В качестве базового варианта принята гладкая цилиндрическая муфта без технологических колец с угловым швом, оба катета которого равны толщине стенки муфты. При этом пластическая деформация за один цикл нагружения в концентраторе рассчитывалась методом конечных элементов. Считаем, что базовое число циклов соответствует 15 годом эксплуатации.

Расчет в ПК «СВАРКА» [7] на модели с мелкой сеткой конечных элементов у концентратора показал весьма высокий уровень концентрации напряжений и деформаций в корне шва (рис. 2 и 3). При внутреннем давлении 12,78 МПа номинальные напряжения на гладком участке трубопровода составляют около 328 МПа, а в концентраторе превышают 1000 МПа. Пластическая деформация в корне шва достигает 0,82%.

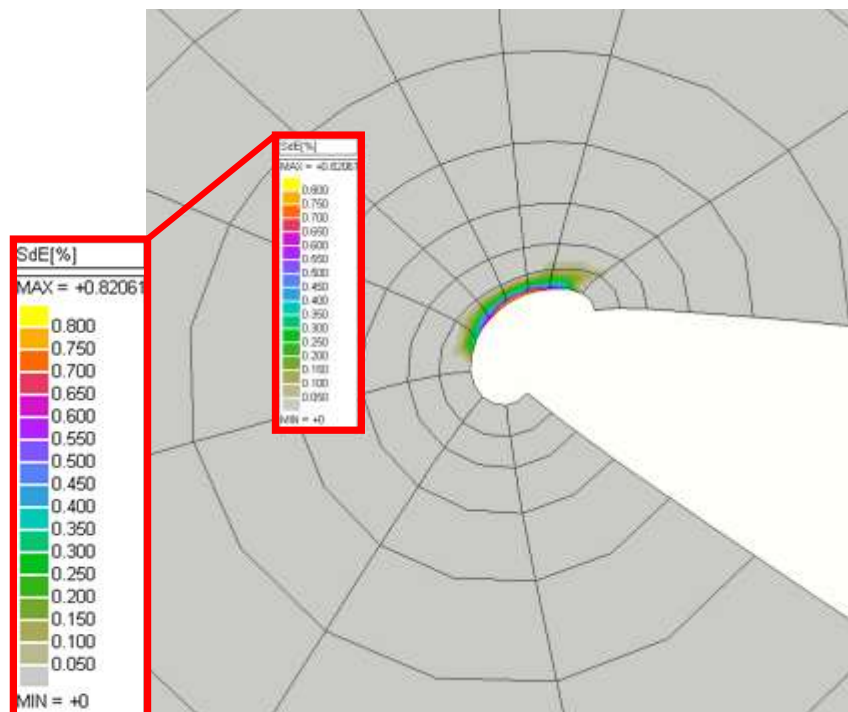


Рис. 2. Распределение пластических деформаций в корне сварного шва приварки сварной муфты к трубе

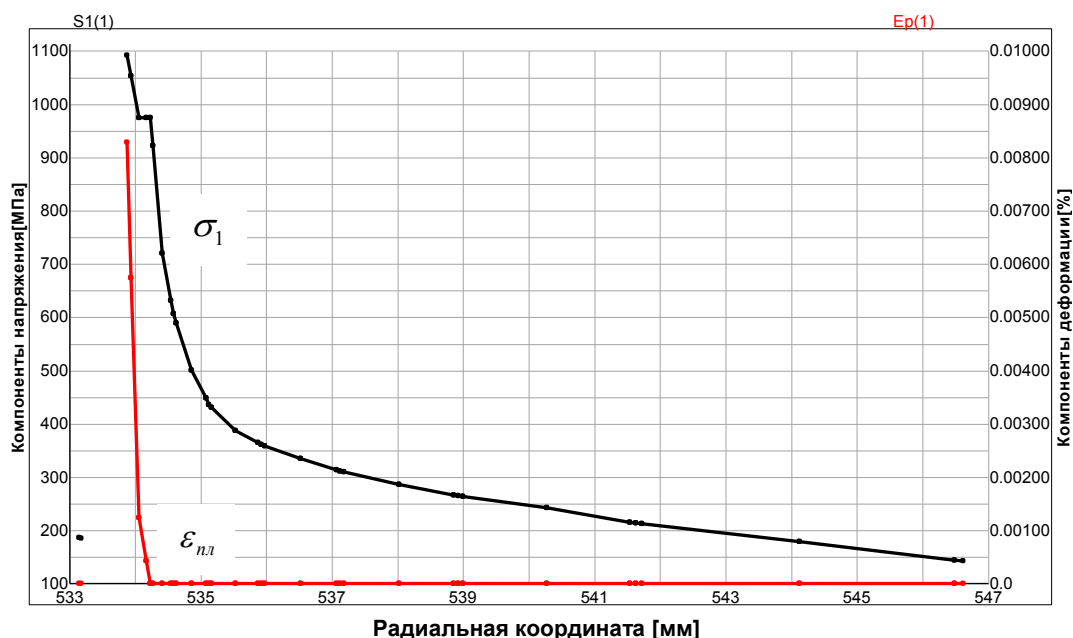


Рис. 3. Распределение максимальных растягивающих напряжений σ_1 и пластических деформаций $\varepsilon_{нл}$ по минимальному сечению углового шва

На рис. 4 представлены результаты параметрических исследований способов повышения несущей способности муфты за счет увеличения его сечения. В качестве показателя выпуклости шва использовано отношение размера минимального сечения выпуклого шва к сечению шва с прямой гипотенузой. Увеличение выпуклости шва может быть достигнуто наплавкой дополнительных валиков или «обратной» разделкой кромок со скосом на внутренней поверхности муфты. При этом циклическая долговечность возрастает за счет увеличения минимального сечения шва (рис. 4,а). Аналогичное действие оказывает и изменение соотношения катетов шва, также приводящее к увеличению его минимального сечения (рис. 4,б). Однако достигаемая расчетная долговечность ниже требуемой (30 лет).

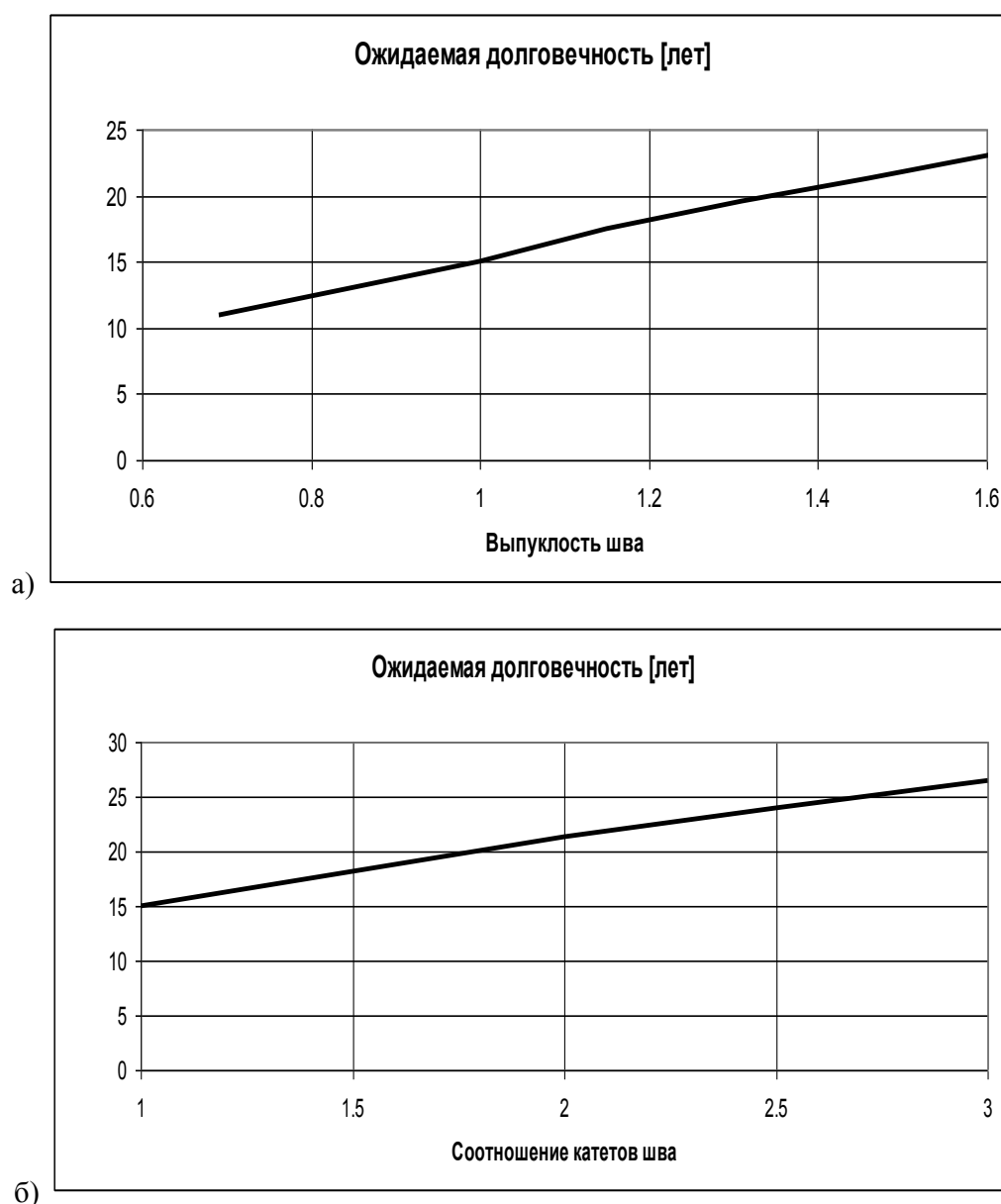


Рис. 4. Зависимость долговечности от параметров шва: а – от выпуклости, б – от соотношения катетов

Эффект от применения разгрузочных колец зависит от их ширины и толщины, а также расположения относительно торца муфты. Эти параметры определяют жесткость сварного соединения. Моделирование муфт с кольцами проведено для случая швов с равными катетами, без выпуклости и с минимальным проплавлением. Рис. 5 показывает в виде смещенной сетки конечных элементов изменение условий работы сварного шва при установке рядом с ним технологического кольца.

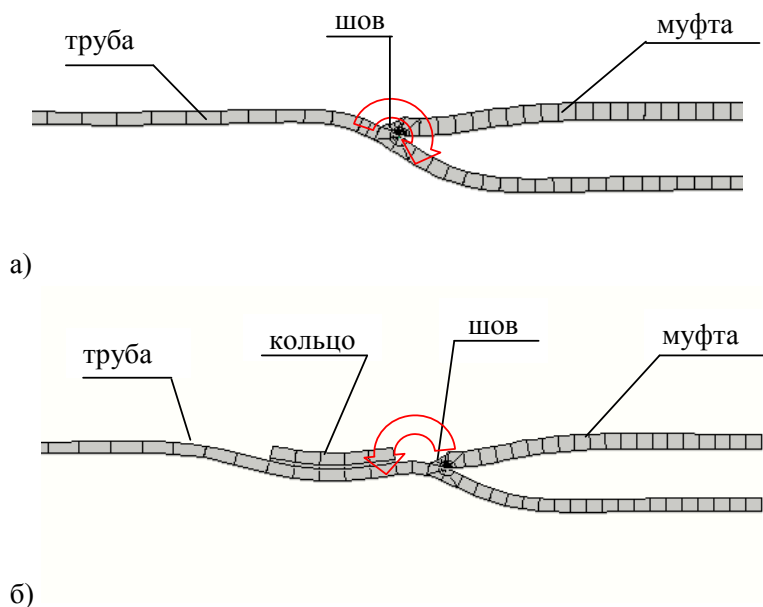


Рис. 5. Влияние технологического кольца (б) на изгиб трубы в зоне шва

На рис. 6 показано влияние на долговечность расположения кольца относительно торца муфты (расстояния между швом и разгрузочным кольцом).

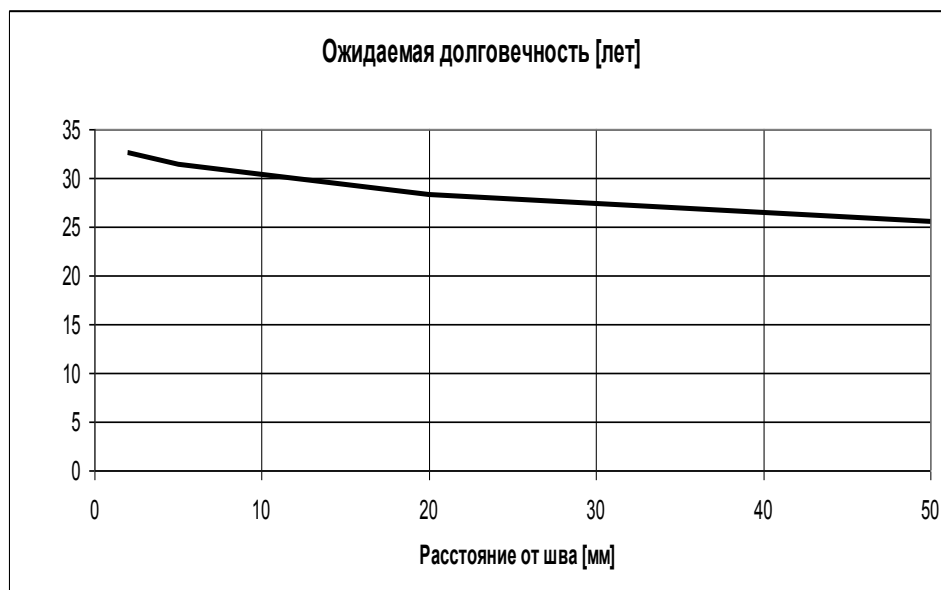


Рис. 6. Зависимость долговечности от расстояния между швом и разгрузочным кольцом

Толщина кольца принята равной толщине муфты (26 мм), ширина кольца 200 мм. При моделировании муфт с другими размерами разгрузочных колец они располагались вплотную к шву (на расстоянии 1 мм). Как видно на рис. 6, такое расположение является наиболее выгодным.

Уменьшение толщины кольца до 15 мм не приводит к заметному снижению долговечности (рис. 7,а). В то же время тонкое кольцо гораздо легче смонтировать с минимальным зазором. Наличие зазора между кольцом и трубой более 0,5 мм снижает его влияние на долговечность сварного соединения, а зазор свыше 1 мм полностью устраняет его контакт с трубой (график 1 на рис. 7,б).

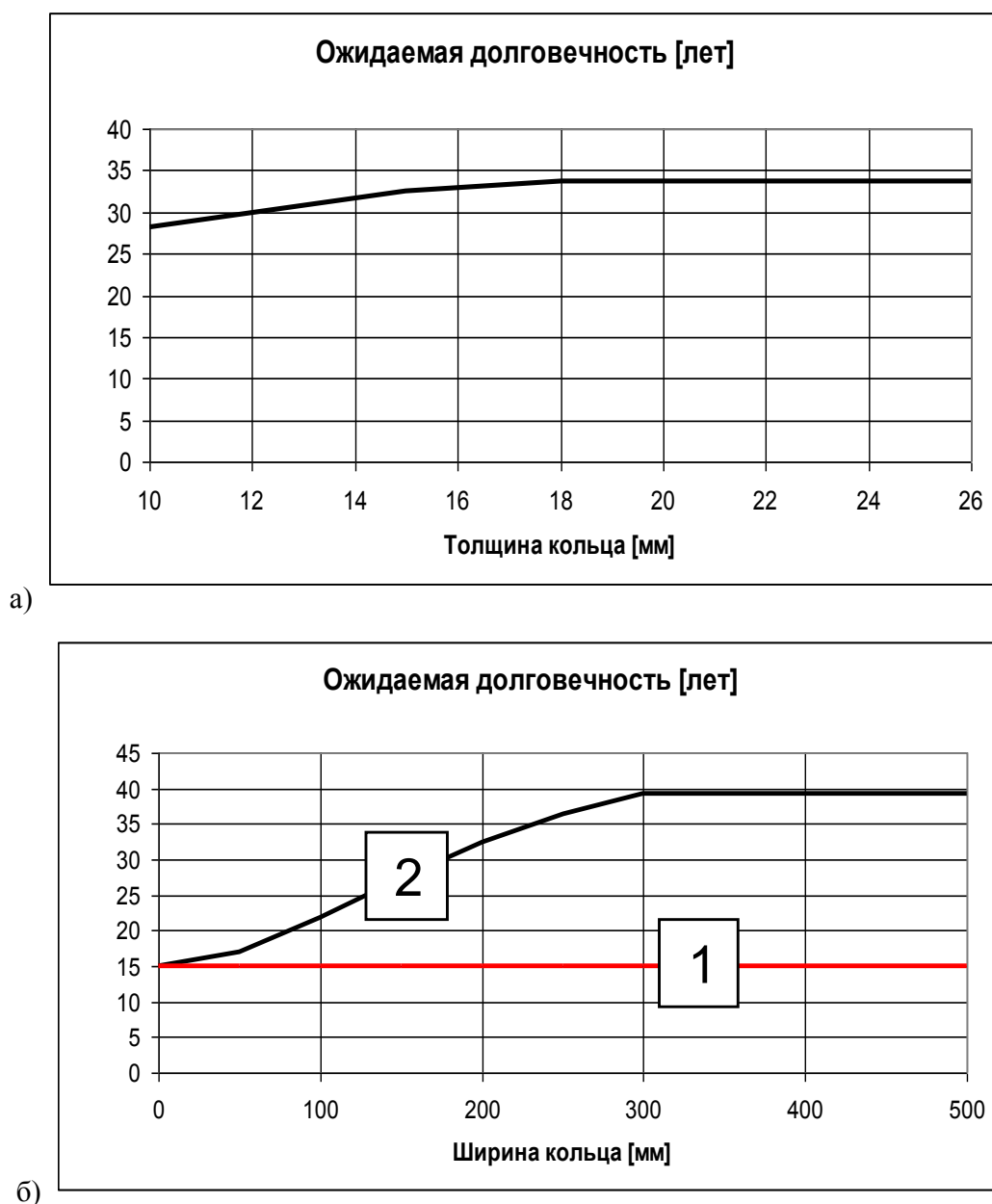


Рис. 7. Зависимость долговечности от размеров разгрузочного кольца. а – от толщины кольца при ширине 200 мм, б – от ширины кольца при толщине 15 мм (1 – кольцо с зазором 1 мм, 2 – плотная осадка кольца)

При плотной посадке увеличение ширины кольца существенно повышает долговечность. Кривая 2 построена по результатам моделирования при постоянной толщине кольца (15 мм).

Кольцо имеет ограниченную жесткость, и его плотная посадка на трубу технически осуществима даже при овальности сечения ремонтируемого участка трубы. Существенно сложнее обеспечить посадку самой муфты с соблюдением нормативных требований по величине зазора между муфтой и трубой. При изменении зазора существенно изменяются также условия формирования корня углового шва, поэтому чисто расчетные исследования не могут обеспечить необходимой достоверности. Однако расчет показывает, как изменяется долговечность при больших значениях зазора (рис. 8). Рассмотрен вариант с полностью заваренным промежутком между муфтой и разгрузочным кольцом.

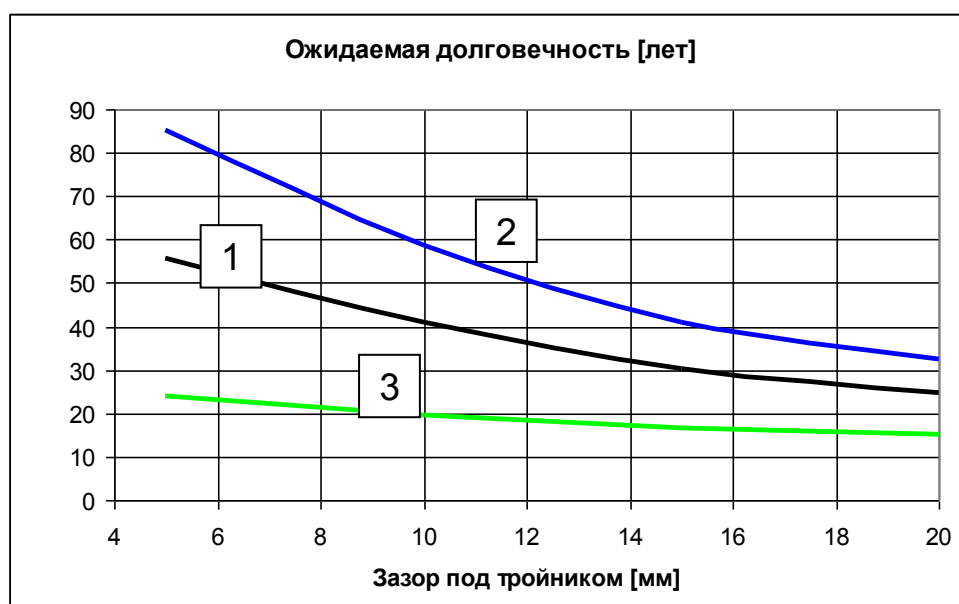


Рис. 8. Зависимость долговечности от зазора между муфтой и трубой: 1 и 2 – с разгрузочными кольцами толщиной 15 и 26 мм, 3 – без разгрузочных колец

Расчет показывает существенное снижение долговечности при увеличении зазора между муфтой и трубой. Можно отметить, что в случае большого зазора применение более толстого разгрузочного кольца дает некоторый полезный эффект. При посадке кольца на трубу с зазором оно перестает действовать (заваренный зазор эквивалентен выпуклому шву).

Итоги численных экспериментов представлены на рис. 9. Рассмотрено повышение долговечности, по сравнению с базовым вариантом 1, от следующих изменений:

2 – от увеличения минимального сечения шва за счет «обратной» разделки или наплавки дополнительных валиков с получением выпуклого шва;

3 – от установки разгрузочного кольца шириной 300 и толщиной 15 мм вплотную к шву;

4 – от установки разгрузочного кольца шириной 200 и толщиной 15 мм при выпуклом шве;

5 – от установки разгрузочного кольца шириной 200 и толщиной 15 мм при полной заварке зазора между муфтой и кольцом;

6 – от использования всех полезных изменений (рекомендуемый вариант).



Рис. 9. Итоги численных экспериментов

Элементы конструктивного оформления и этапы монтажа рекомендуемого варианта представлены на рис. 10.

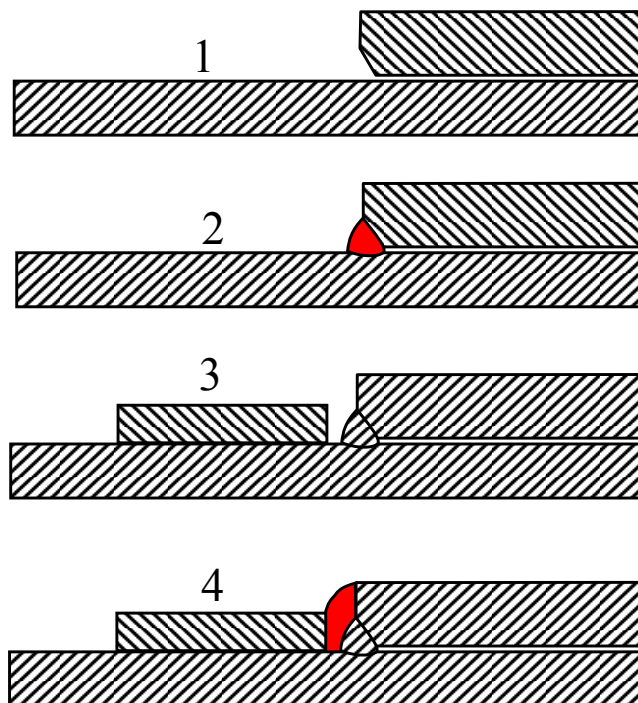


Рис. 10. Этапы монтажа ремонтной конструкции

1. Вначале на трубу устанавливается муфта. На краях муфты имеется «обратная» разделка глубиной 5 мм.
2. Производится приварка муфты небольшим угловым швом (с катетом 10 мм). При этом заполняется разделка кромки муфты.
3. Устанавливается и сваривается разрезное кольцо с минимальным зазором между трубой и кольцом (желательно с натягом). Размеры сечения кольца 200x15 мм. Расстояние между кольцом и муфтой выбирается из условий удобства заварки промежутка между ними.
4. Заваривается промежуток между кольцом и муфтой.

Характер работы рекомендуемой конструкции под нагрузкой иллюстрирует рис. 1б. Предложенные изменения приводят к существенному уменьшению изгиба шва. Ожидаемое повышение циклической долговечности – в 6 раз по сравнению с базовым вариантом.

Заключение

Разрабатываемые меры по повышению долговечности муфты были направлены на уменьшение изгибающего момента в шве и на усиление шва. Параметрические исследования на компьютерной модели позволили выбрать конструкцию муфты и сочетание ее размеров, обеспечивающие ее циклическую долговечность более 10000 циклов.

Расчеты показали, что для повышения ресурса в два раза увеличение расчетного сечения шва является недостаточным. Более эффективно применение разгрузочных колец, повышающих жесткость сварного узла и способствующих снижению концентрации напряжений. Однако основной недостаток такого способа повышения ресурса состоит в том, что при наличии зазора между муфтой и трубой вследствие овальности трубы более 1,0 мм разгрузочное кольцо не участвует в работе конструкции. Особые сложности могут возникнуть при применении труб большой толщины (свыше 30 мм). В этом случае для обеспечения плотного прилегания ремонтной конструкции необходимы значительные усилия обжатия, создание которых в полевых условиях затруднено.

Таким образом, установка вместе с муфтой технологических колец с натягом и их приварка к торцам муфты должны существенно повысить срок службы ремонтных конструкций (или отремонтированного участка). Однако проведенные исследования на компьютерной модели имеют ряд допущений. В частности, на ресурс сварного соединения оказывает влияние также технологический процесс сварки: остаточные сварочные напряжения особенности формирования шва, дефекты сварного соединения (наличие которых в сварном соединении неизбежно). Поэтому представленный расчет следует рассматривать как предварительный. Для отладки модели необходимо сопоставление поведения модели под нагрузками с результатами натурных испытаний.

Список литературы

1. РД-75.180.00-КТН-193-08 (с изм.1 2005, изм.2 2009). Технология установки ремонтных конструкций на трубопроводы диаметром 1067 и 1220 мм с давлением 10 МПа. Введен 2008-11-14. ОАО «АК «Транснефть» 2008. 70 с.
2. Куркин А.С., Королев С.А., Пономарев П.А. Анализ причин ограниченного ресурса конструкций для ремонта нефтепровода // Сварка и диагностика. 2014. № 5. С. 58-61.
3. Зайнуллин Р.С., Воробьев В.А., Александров А.А. Повышение безопасности нефтепродуктопроводов ремонтными муфтами / под ред. проф. Р.С. Зайнуллина. Уфа: РИО РУНМЦ МО РБ, 2005. 119 с.
4. Зайнуллин Р.С., Воробьев В.А. Ремонтные муфты повышенной работоспособности / под ред. акад. А.Г. Гумерова. Уфа: РИО РУНМЦ МО РБ, 2005. 84 с.
5. Адиев Р.К. Повышение несущей способности ремонтных муфт металлическими бандажами // Техническая диагностика и ресурс: матер. Конгресса нефтегазопромышленников России. Уфа: ТрансТЭК, 2001. С. 7-11.
6. Зандберг А.С. Инженерная оценка конструктивных параметров ремонтных сварных муфт магистральных трубопроводов // Сварка и диагностика. 2009. № 6. С. 25-29.
7. Куркин А.С., Макаров Э.Л. Программный комплекс «Сварка» – инструмент для решения практических задач сварочного производства // Сварка и диагностика. 2010. № 1. С. 16-24.

Lifetime Extension of Welded Sleeves for Pipeline Repair Based on Computer Simulation

A.S. Kurkin¹, S.A. Korolev¹, P.A. Ponomarev^{1,*}

^{*}pa.ponomarev@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: lifetime, welded sleeve, stress state, lifetime increasing, computer simulation

The exhausted design lifetime of main pipelines makes it necessary to extend their service life up to 100 years. This explains the urgency for development of repair designs providing post-repair lifetime level equal to the intact pipe. The paper presents the parametric study results of methods for increasing the lifetime of sleeves after repair to restore the pipeline functionality. Based on analysis of the stress state under external loads the paper offers a computer-simulated option of the sleeve design to provide a significantly increased lifetime.

References

1. RD-75.180.00-KTN-193-08 (*s izm.1 2005, izm.2 2009*). *Tehnologija ustanovki remontnykh konstruktsiy na truboprovody diametrom 1067 i 1220 mm s davleniem 10 MPa* [Guidelines - 75.180.00-KTN-193-08 (revised in 2005, revised in 2009). Technology for installation of repair structures on pipelines with diameter of 1,067 and 1,220 mm with pressure of 10 MPa]. Transneft JSC Publ., 2008. 70 p. (in Russian).
2. Kurkin A.S., Korolev S.A., Ponomarev P.A. Analysis of the reasons for limited service life of structures for pipeline repair. *Svarka i diagnostika = Welding and diagnostics*, 2014, no. 5, pp. 58-61. (in Russian).
3. Zainullin R.S., Vorobyev V.A., Aleksandrov A.A. *Povyshenie bezopasnosti nefteproduktoprovodov remontnymi muftami* [Improving the safety of oil pipelines with repair couplings]. Ufa, Printing and Publication of Department of Republican Academic Methodical Centre of RB Ministry of Education, 2005. 119 p. (in Russian).
4. Zainullin R.S., Vorob'ev V.A. *Remontnye mufty povyshennoi rabotosposobnosti* [Repair couplings with increased working capacity]. Ufa, Printing and Publication of Department of Republican Academic Methodical Centre of RB Ministry of Education, 2005. 84 p. (in Russian).
5. Adiev R.K. Increasing the bearing capacity of repair couplings with metal bandages. *Tekhnicheskaya diagnostika i resurs: mater. Kongressa neftegazopromyshlennikov Rossii*

[Technical diagnostics and resource: proc. of Congress of Russian Oil and Gas Industrialists]. Ufa, TransTEK, 2001, pp. 7-11. (in Russian).

6. Zandberg A.S. Evaluation of engineering design parameters of repair welded couplings of pipelines. *Svarka i diagnostika = Welding and diagnostics*, 2009, no. 6, pp. 25-29. (in Russian).
7. Kurkin A.S., Makarov E.L. WELDING program complex is the instrument for solving the welding production practical tasks. *Svarka i diagnostika = Welding and diagnostics*, 2010, no. 1, pp. 16-24. (in Russian).