

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ЗОН СВАРНОГО СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ НА РАБОТУ СОЕДИНЕНИЯ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СТАДИИ ДЕФОРМАЦИИ

Берг В.И.<sup>1</sup>, Чекардовский М.Н.<sup>2</sup>, Якубовская С.В.<sup>1</sup>, Торопов В.С.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: berg@tsogu.ru,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет», Тюмень, Россия, (625001, Тюмень, ул. Луначарского, д. 2), e-mail: ktgv@tgasu.ru,

<sup>3</sup>Ноябрьский институт нефти и газа ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: 264301@mail.ru.

В статье выяснены особенности работы сварного стыкового соединения в упругопластической стадии деформации с учетом неоднородности механических свойств характерных для сварных соединений полученных сваркой плавлением. Анализ состояния длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов показал, что в сварных соединениях присутствует механическая неоднородность, которая проявляется в разупрочненных участках (мягких прослойках). На основе анализа напряженно-деформированного состояния механически-неоднородного сварного стыкового соединения установлены зависимости относительной толщины мягкой прослойки от коэффициента контактного упрочнения. Установлено, что причиной снижения трещиностойкости является неоднородность структуры и механических свойств сварного соединения. Основное содержание исследований это разработка методов повышения упругопластических характеристик сварного соединения. Результаты исследований рекомендуется использовать при проектировании и производстве сварочно-монтажных работ в процессе сооружения и ремонта магистральных трубопроводов.

Ключевые слова: магистральные трубопроводы; сварное соединение; металлические конструкции; механическая неоднородность; прочность; надежность; пластические деформации; упругие деформации.

## INFLUENCE OF HETEROGENEITY OF MECHANICAL PROPERTIES OF VARIOUS ZONES OF THE WELDED BUTT JOINTS WORK CONNECTIONS IN ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION STAGE

Berg V.I.<sup>1</sup>, Chekardovsky M.N.<sup>2</sup>, Yakybovskaya S.V.<sup>1</sup>, Toropov V.S.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>FGBO of higher education "Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38), e-mail: berg@tsogu.ru

<sup>2</sup>Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Tyumen, Russia, (625001, Tyumen, Lunacharskogo street, 2), e-mail: ktgv@tgasu.ru.

<sup>3</sup>Noyabrsk oil and gas institute of FGBO of higher education "Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38), e-mail: 264301@mail.ru

The article reveals the features of the welded butt joint in the elastic-plastic deformation stage, taking into account the heterogeneity of mechanical properties characteristic of the welded joints obtained by fusion welding. Based on the analysis of long-operated trunk pipelines it found that the compound is present in the welded mechanical heterogeneity, which is manifested in the areas of softening (soft interlayers). The main content of research is to develop methods to increase elastoplastic characteristics of the welded joint. The results of studies recommended for use in the design and production of welding and assembly works in the construction and repair of pipelines.

Keywords: pipelines; welded joints; metal constructions; mechanical heterogeneity; strength; reliability; plastic deformation; elastic deformation.

В Российской Федерации нефтегазовая промышленность играет ключевую роль, как в энергетическом комплексе, так и в экономике страны. Трубопроводный транспорт является важнейшим и наиболее ответственным звеном в системе обеспечения углеводородным сырьем внутренних и внешних потребителей. Поэтому поддержание на требуемом уровне

основных показателей надежности стальных конструкций магистральных трубопроводов является актуальной темой исследований.

Целью исследования является повышение безотказности объектов магистральных трубопроводов за счет прочностной оптимизации механических и геометрических параметров сварного стыкового соединения.

На основании выполненной работы установлено влияние механической неоднородности различных зон сварного соединения на работу соединения в упругопластической стадии деформации. Результаты исследований рекомендуется использовать при проектировании технологических процессов сварочно-монтажных работ в ходе сооружения и ремонта объектов магистральных трубопроводов.

Объектами исследования являются сварные стыковые соединения базовых конструкций магистральных трубопроводов. Предметом исследования является работа механически-неоднородного сварного стыкового соединения в упругопластической стадии деформации.

Конструкции и оборудование в нефтегазовой отрасли относятся, в основном, к листовым соединениям. В системе добычи и транспорта это сборные трубопроводы месторождений, низконапорные газовые сети, магистральные транспортные трубопроводы, объемные конструкции, технологические трубопроводы и др.

Все выше перечисленные конструкции являются сварными. Поэтому для их изготовления используют низкоуглеродистые и низколегированные стали, обладающие хорошей свариваемостью и достаточно высокой сопротивляемостью зарождению и развитию дефектов, которые могут привести к разрушению сооружения в целом или отдельных его узлов. Большинство этих сталей относится к ферритоперлитному классу[4,5].

Сварное соединение является конструктивным и технологическим концентратором напряжений. Большая часть сварных соединений газопроводных конструкций представляет собой стыковые швы. Зона сварных соединений отличается так же структурной неоднородностью, обуславливающей неоднородность механических свойств, причём наиболее резкое изменение структуры наблюдается в около шовной зоне (зона термического влияния). В частности, неоднородность механических свойств проявляется в наличии разупрочнённых участков сварного соединения (мягких прослоек), где предел текучести ниже, чем у основного металла.

Влияние механической неоднородности на напряжённо-деформированное состояние сварного соединения основывается на сдерживании одними его участками деформации других участков при нагружении. При поперечном деформировании сварного соединения с мягкой прослойкой (рис. 1), мягкая прослойка (шов), первой вступит в пластическую

деформацию, развитию которой сразу же станут препятствовать прилегающие участки более прочной зоны металла, так как они продолжают работать в области упругих деформаций.

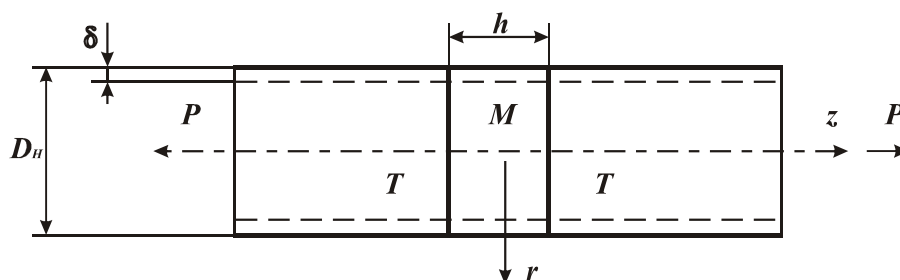


Рис. 1. Условное изображение сварного соединения трубопровода, имеющего поперечную мягкую прослойку:

$\chi = 2h/\delta$  - относительная толщина мягкой прослойки, где  $\delta$  - толщина стенки трубы

Сдерживание пластической деформации мягкой прослойки связано с тем, что коэффициент поперечной деформации при пластической работе материала, равный 0,5, заведомо превышает значение коэффициента поперечной деформации при упругой работе (коэффициент Пуассона), который для стали находится в пределах 0,25 – 0,33. Это приводит к возникновению сложного напряжённого состояния, которое приобретает объёмный характер и, в конечном счёте, существенно влияет на прочность, запасы пластичности, энергоёмкости соединения, место и характер его разрушения. Особенно сильно сдерживание пластической деформации проявится, когда в мягкой зоне металла должна образоваться шейка, что связано с быстрым нарастанием поперечных деформаций. Но в результате сдерживания образование шейки в мягком металле произойдёт с задержкой во времени и при большем уровне средних растягивающих напряжений, что будет означать повышение прочности мягкой прослойки. Это повышение прочности обуславливается так называемым эффектом «контактного упрочнения» мягкой прослойки, т.к. взаимодействие мягкого и твёрдого металлов происходит по контактными поверхностям.

Вследствие контактного упрочнения прочность мягкой прослойки так и не достигает прочности основного металла, так как величина напряжённого состояния металла, окружающего прослойку, оказывается в значительной степени меньшей по сравнению с величиной напряжённого состояния мягкой прослойки. В результате металл, окружающий прослойку, начинает пластически деформироваться, тем самым ослабляя эффект упрочнения.

Предельное значение средних напряжений в механически неоднородном соединении определяем по формуле:

$$\sigma_{np.} = \sigma_T^M \cdot k_\chi \cdot k_p \quad (1),$$

где  $\sigma_T^M$  – прочность металла мягкой прослойки;

$k_\chi$  – коэффициент контактного упрочнения мягкой прослойки;

$k_p$  – коэффициент реализации контактного упрочнения.

Коэффициент контактного упрочнения для случая поперечной мягкой прослойки в растягиваемой трубе зависит от наружного диаметра трубопровода и толщины стенки и определяется по следующей формуле:

$$k_\chi = \frac{\pi}{4} + \frac{1+2 \cdot \gamma}{(1+\gamma) \cdot 3 \cdot \sqrt{3} \cdot \chi} \quad (2),$$

где  $\gamma = 1 - \delta/D$  – параметр, учитывающий соотношение наружного диаметра и толщины стенки (рис. 2).

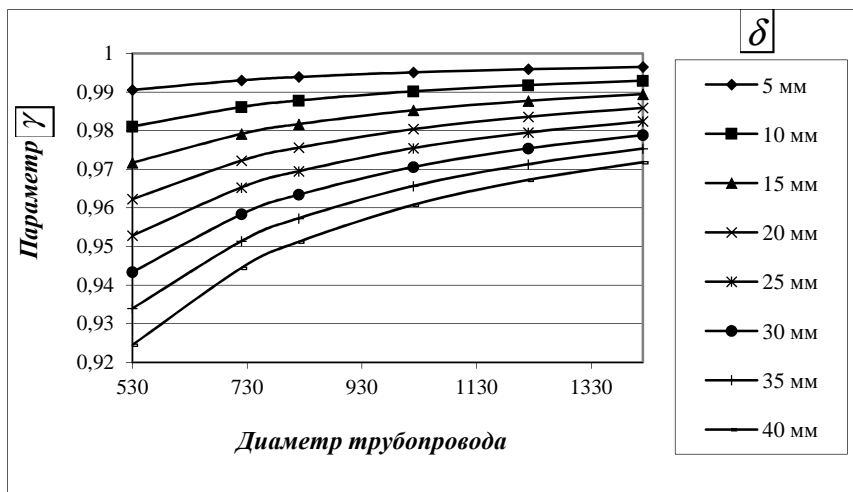


Рис. 2. К определению параметра  $\gamma$

Из предположения о том, что контактное упрочнение может реализоваться полностью (что вполне соответствует реальному сварному соединению, подкрепленному более прочными участками зоны термического влияния), определяются значения коэффициента механической неоднородности, при которых будет соблюдаться условие равнопрочности соединения с мягкой прослойкой с известным эквивалентным значением относительной толщины прослойки.

Так как прочность сварного соединения с мягкой прослойкой не может превышать прочности основного металла, можно зная значение относительной толщины мягкой прослойки найти коэффициент механической неоднородности который будет отвечать условию равнопрочности сварного соединения с мягкой прослойкой. Коэффициент механической неоднородности определяем по формуле (2) подставляя вместо значения  $k_\chi$  искомое значение  $k_p$ . Зависимость допустимого коэффициента механической неоднородности в растягиваемой трубе от относительной толщины мягкой прослойки представлена на рис. 3:

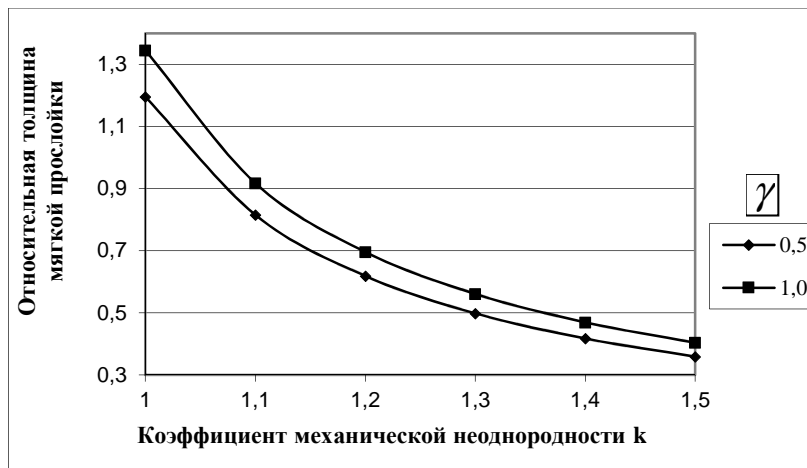


Рис. 3. Контактное упрочнение мягкой прослойки

Степень проявления эффекта контактного упрочнения, а вместе с ним уровень прочности, пластичности, энергоёмкости соединения, место и характер его разрушения, существенно зависят от относительных размеров и формы мягкой прослойки, соотношения свойств её металла и металла соседних участков соединения и от степени компактности сечения соединительных элементов.

Рассмотрим соединение, которое наиболее соответствует реальному сварному стыковому соединению. Это соединение, в котором значение относительной толщины мягкой прослойки меньше критического значения  $\chi_{кр}$  (значение при котором с уменьшением относительной толщины прослойки начинается контактное упрочнение), равного  $\chi_B$ , и мягкая прослойка подкреплена участками ЗТВ.

$$\chi_B^{mp} = \frac{1 + 2 \cdot \gamma}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot (1 + \gamma) \cdot \left( k_B - \frac{\pi}{4} \right)} \quad (3)$$

где  $k_B = \sigma_B^T / \sigma_B^M$  - коэффициент механической неоднородности по прочности.

Здесь разрушение произойдет по основному металлу (рис. 4), так как прочность мягкой прослойки превышает прочность последнего.



Рис. 4 Характерный тип разрушения сварного стыкового соединения

В данном случае относительное сужение соединения будет равным относительному сужению основного (“твердого”)металла  $\psi = \psi^T$  и относительное удлинение также будет практически отвечать указанной характеристике для основного (“твердого”) металла  $\delta_{удл.} = \delta_{удл.}^T$ .

Для получения формул зависимости пластических характеристик соединения от относительной толщины мягкой прослойки  $\chi$  используются экспериментально установленные данные независимости истинного сопротивления разрыву вязкой прослойки  $P_K$  от  $\chi$  в широком диапазоне толщины прослойки и равенство указанной характеристики величине  $P_K^M$ , полученной при испытании стандартных образцов, вырезанных из мягкого металла.

Коэффициент  $k_\chi$ , описывающий контактное упрочнение для  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$ , можно с достаточной точностью распространить на любую степень пластической деформации, т.е. считать, что  $\sigma_i = \sigma_i^M \cdot k_\chi$ . В этом случае условие  $P_K = P_K^M$  можно записать в виде:

$$\frac{\sigma_B}{1-\psi} = \frac{\sigma_B^M \cdot k_\chi}{1-\psi} = \frac{\sigma_B^M}{1-\psi^M} \quad (4)$$

Получаем формулу для определения относительного сужения механически неоднородного сварного соединения:

$$\psi = 1 - k_\chi \cdot (1 - \psi^M) \quad (5)$$

На рис. 5 представлена зависимость относительного сужения  $\psi$  механически-неоднородного сварного соединения от относительной толщины мягкой прослойки  $\chi$  при различных значениях относительного сужения металла прослойки.

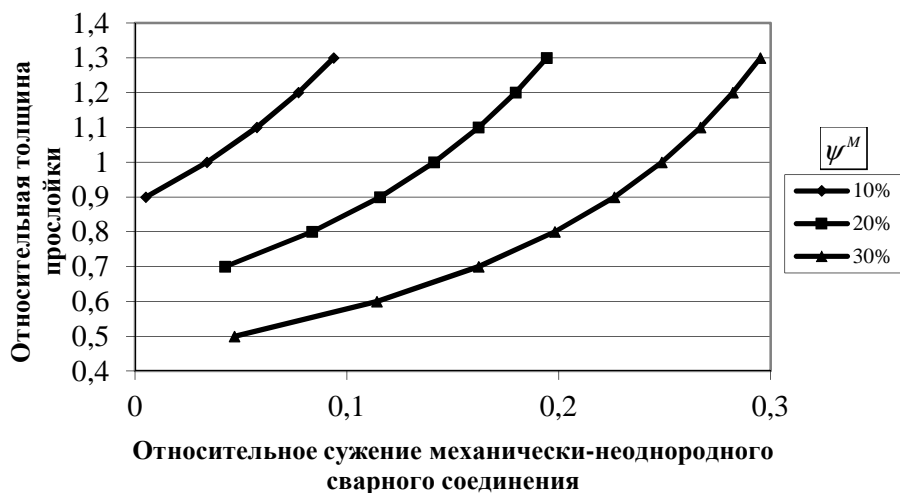


Рис. 5. Зависимость  $\psi$  от  $\chi$

Формула для соединения элементов компактного сечения имеет следующий вид:

$$\delta_{\text{удл.}} = \frac{1}{n} \left[ \left( \frac{15}{3\alpha + 4\sqrt{k_{\chi}\alpha b + 8k_{\chi}b}} - 1 \right) \chi + (n - \chi) \delta_i^T \right] \quad (6),$$

здесь  $n = l_0/d_0$  - кратность образца;  $\alpha = 1 - \psi_i^T$ ;  $b = 1 - \psi^M$ ;  $\psi_i^T$  и  $\delta_i^T$  - соответственно относительное сужение и относительное удлинение твердого основного металла, реализованные к моменту разрушения соединения, т.е. при средних напряжениях  $\sigma_B = \sigma_B^M \cdot k_{\chi}$ .

Диаграммы растяжения образцов (рис. 6) позволяют оценить поведение материала в упругой и упругопластической стадиях деформирования, а также определить механические характеристики материала.

Результаты испытаний на растяжение подтверждают увеличение пластических свойств сварного стыкового соединения с мягкой прослойкой без снижения прочностных характеристик при ограничении величины относительной толщины мягкой прослойки.

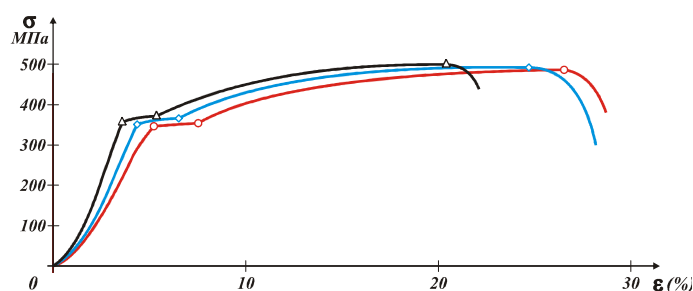


Рис. 6. Диаграммы растяжения экспериментальных образцов:  
 —○— - диаграмма растяжения оптимизированного сварного соединения;  
 —△— - диаграмма растяжения стандартного сварного соединения;  
 —◇— - диаграмма растяжения образца из стали

Проведенные исследования подтверждают возможность создания такого сварного соединения, в котором шов, являясь мягкой прослойкой, повысит несущую способность соединения за счет увеличения зоны упругих деформаций и перераспределения поля напряжений.

### Список литературы

1. Вахитов А.Г. Разработка методов расчёта прогнозируемого и остаточного ресурса нефтегазового оборудования и трубопроводов с учетом механохимической коррозии и неоднородности: Дис. ... д.т.н: 25.00.19, 05.26.03 / ГУП «ИПТЭР» – Уфа: - 2003. – 305 с.

2. Иванов В.А., Лысяный К.К. Надёжность и работоспособность конструкций магистральных нефтепроводов — СПб: Наука, 2003. — 319 с.
3. Некрасов В.О. Разработка методики гидравлического расчета устройства размыва и предотвращения образования нефтяных донных осадков в вертикальных стальных резервуарах / Некрасов В.О., Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Левитин Р.Е. // Территория Нефтегаз. - 2014. - № 11. - С. 79-82.
4. Некрасов В.О. Математическое моделирование двупараметрического вихревого потока нефти в вертикальных стальных резервуарах при работе системы предотвращения образования нефтяных донных отложений / В.О. Некрасов, Р.Е. Левитин, А.В. Майер // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2014. - №5. - С.63-65.
5. Сенцов С.И., Берг В.И. Оценка предельных параметров механически неоднородных сварных соединений с трещиноподобными дефектами. // Нефть и газ, 2005, № 2, С. 19-22.

**Рецензенты:**

Иванов В.А., д.т.н., профессор кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г.Тюмень;

Соколов С.М., д.т.н., профессор кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г.Тюмень.