ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШОВНЫХ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ НА НЕФТЕБАЗАХ ИЛИ ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

THE USE OF STEEL ARC WELDING PIPES ON TANK FARMS OR OIL AND GAS INDUSTRY OBJECTS

М. И. Сизяков

Mikhail I. Sizyakov

Акционерное общество
«Топливная Компания ТВК»,
г. Жуковский, Московская область,
Российская Федерация

Fuel Company TVK,
Zhukovskiy, Moscow Region,
Russian Federation

В последние годы использование высокопрочных сталей значительно снизило стоимость материалов для трубопроводов. Однако затраты на выравнивание, сварку, контроль и покрытие обычно составляют около 20 % от общей стоимости трубопровода.

С появлением новых технологий дуговой сварки создаётся потенциал для снижения затрат в строительстве трубопроводов.

Необходимость строительства трубопроводов большого диаметра на больших расстояниях привела к увеличению потребности в повышении производительности кольцевой сварки трубопровода.

Электродуговая полуавтоматическая газо-металлическая сварка остается доминирующей технологией кольцевой сварки труб. В статье описаны процессы дуговой сварки, контроль микроструктуры сварного шва, сварочный материал для трубопроводов в условиях агрессивной среды, современное состояние сварки магистральных трубопроводов в РФ, инновационные сварочные технологии, приводящие к дальнейшему значительному увеличению производительности дуговой сварки.

Наиболее перспективным способом сварки при сооружении и ремонте магистральных трубопроводов является дуговая сварка покрытыми электродами. Как правило, при полуавтоматической сварке стыков секций магистральных трубопроводов в качестве электрода применяется проволока сплошного сечения и защитный газ. Повышения производительности сварочно-монтажных работ можно добиться внедрением новых энергоэффективных способов сварки, частичной или полной заменой имеющегося сварочного оборудования, применением инновационных сварочных материалов.

Recently, the use of high-strength steels has significantly reduced the cost of pipeline materials. However, alignment, welding, inspection, and coating costs typically account for about 20 % of the total cost of the pipeline.

Due to invention of new arc welding technologies, potential to reduce costs in the construction of pipelines is being created.

The need to build large-diameter pipelines over long distances has led to an increase in the need to improve the performance of ring welding of the pipeline.

Electric semi-automatic gas-metal welding remains the dominant technology of annular pipe welding. The article describes the processes of arc welding, control of the microstructure of the weld, welding material for pipelines in aggressive environments, the current state of welding of main pipelines in the Russian Federation, innovative welding technologies leading to a further significant increase in the performance of arc welding.

Ключевые слова

дуговая сварка; трубопровод;
микроструктура сварного шва;
производительность
дуговой сварки

Key words

arc welding; pipeline;
weld microstructure;
arc welding performance

The most promising method of welding in the construction and repair of pipelines is arc welding with coated electrodes. As a rule, in semi-automatic welding of joints of sections of trunk pipelines, solid wire and protective gas are used as the electrode. Improving the productivity of welding and installation works can be achieved by introduction of new energy-efficient welding methods, partial or complete replacement of existing welding equipment, the use of innovative welding materials.

Введение

Спрос на энергию продолжает расти. Нефть и газ сейчас удовлетворяют 57 % энергетических потребностей, и смогут удовлетворить как минимум 49 % мировых потребностей энергии в 2040 году, отмечается в отчете [1].

Прогнозируется, что мировое потребление газа увеличится почти вдвое за 24 года: с 90 триллионов кубических футов в 2000 году до 176 триллионов кубических футов в 2025 году [1].

Материалы и рабочая сила, необходимые для монтажа трубопровода, составляют большую часть затрат: 29 % затрат приходится на материалы и 49 % — на наземные трубопроводы.

В последние годы использование высокопрочных сталей значительно снизило стоимость материалов для трубопроводов. Однако затраты на выравнивание, сварку, контроль и покрытие обычно составляют около 20 % от общей стоимости трубопровода.

С появлением новых технологий дуговой сварки создаётся потенциал для снижения затрат в строительстве трубопроводов.

1. Процессы дуговой сварки

Дуговая сварка является одним из нескольких процессов сварки для соединения металлов. При интенсивном нагревании металл в соединении между двумя частями расплавляется и смешивается. При охлаждении и затвердевании образуется металлургическая связь.

В дуговой сварке интенсивное тепло, необходимое для плавления металла, вырабатывается электрической дугой. Дуга образуется между фактической рабочей поверхностью и электродом (стержнем или проволокой), который вручную или механически направляется вдоль соединения.

Дуга создается через зазор, когда цепь находится под напряжением, и кончиком электрода касаются заготовки и недалеко отводят его [2].

Дуга производит температуру около 3600 °C на конце. Это тепло расплавляет как

основной металл, так и электрод, образуя расплавленный металл, который иногда называют «кратером». Кратер затвердевает позади электрода при его перемещении вдоль стыка. Результатом является фьюжн-связь.

1.1 Экранирование дуги

Металлы при высоких температурах, как правило, вступают в химическую реакцию с элементами воздуха — кислородом и азотом. Когда металл в расплавленной ванне вступает в контакт с воздухом, образуются оксиды и нитриды, которые разрушают прочность и ударную вязкость сварного соединения. Поэтому многие процессы дуговой сварки предоставляют средства для покрытия дуги и расплавленной ванны защитным экраном из газа, пара или шлака. Это называется экранированием дуги. Экранирование предотвращает или сводит к минимуму контакт расплавленного металла с воздухом. Примером является гранулированный флюс [2].

Дуговая сварка может выполняться постоянным током с положительным или отрицательным электродом или переменным током. Выбор тока и полярности зависит от процесса, типа электрода, атмосферы дуги и свариваемого металла.

1.2 Параметры сварки, влияющие на степень проникновения сварного шва

Существует несколько параметров сварки, которые влияют на степень проникновения сварного шва.

Полярность: тип используемой сварочной полярности влияет на уровень проникновения. При положительном постоянном токе электрода (DC+) обеспечивается большее проникновение в сварной шов, поскольку в основную пластину направляется больше энергии дуги. И наоборот, при отрицательном постоянном токе электрода (DC-) проникновение в сварной шов меньше, потому что большая часть энергии дуги ориентирована в электрод, а не в опорную плиту [2].

Тип электрода: даже в одном сварочном процессе электроды разных классификаций могут иметь разные характеристики проникновения.

Угол перемещения влияет на то, какая часть силы дуги направлена вниз в опорную плиту. Угол перемещения от 0° до 10° (т.е. электрод, перпендикулярный или преимущественно перпендикулярный пластине) приведет к большему проникновению сварного шва. По мере того как угол перемещения увеличивается, уровень проникновения сварного шва будет уменьшаться [2].

Тип защитного газа: типы защитного газа также влияют на проникновение сварного шва. Защитные газы с более высокой скоростью теплопроводности, такие как 100 %-ый диоксид углерода (CO_2) или 100 %-ый гелий (He), будут давать сварные швы с более широким и глубоким профилем проникновения. В то время как защитные газы с более низкой скоростью теплопроводности, такие как 100 %-ый аргон (Ar) или смесь Ar/ CO_2 или Ar/кислород (O_2), имеют более мелкий профиль проникновения [2].

Диаметр электрода: при сварке с двумя диаметрами одного и того же электрода и с одинаковым уровнем тока, как правило, большее проникновение достигается с электродом меньшего диаметра, чем с электродом большего диаметра.

Скорость перемещения: скорость перемещения электрода вниз по соединению влияет на то, сколько времени энергия дуги должна передаваться в опорную плиту в любой конкретной точке вдоль соединения. По мере увеличения скорости движения количество времени, в течение которого дуга проходит над определенной точкой вдоль соединения, уменьшается, и результирующий уровень проникновения уменьшается.

2. Контроль микроструктуры и свойств сварного шва

В зоне термического влияния (ЗТВ) происходят значительные изменения в микроструктуре и свойствах вследствие преобразований, вызванных тепловыми циклами. ЗТВ можно разделить на несколько подзон в зависимости от пиковой температуры, которую испытал материал. Для областей ЗТВ, в которых достигаются пиковые температуры от 1100°C до 1500°C , стали превращаются в аустенит, зерна которого могут значительно расти в течение высокотемпературной части теплового цикла. Микроструктура, которая развивается в различных частях ЗТВ, зависит от химического состава стали, теплового цикла и размера зерна [3]. Металлы сварного шва затвер-

девают с ячеистой или дендритной структурой. Металл сварного шва начинает затвердевать при температуре ниже примерно 1500°C .

Свариваемость металла труб является одним из важнейших технологических свойств при проектировании оборудования для нефтегазовой промышленности. Для повышения прочности основного материала требуется присадочный металл с сопоставимыми или лучшими механическими свойствами [4].

Часто в сложных условиях добычи нефти соединяют трубы из различных марок стали, например аустенитных и дуплексных или супердуплексных нержавеющей сталей с углеродистыми сталями. В подводной добыче нефти для сварки используются коррозионно-стойкие сплавы на основе никеля для предотвращения водородного растрескивания [5].

В настоящее время наивысшая прочность разнородных сварных соединений контролируется пределом текучести сварного материала электрода до примерно 470 МПа [6].

М. Маннан и соавторы [7] недавно представили новый присадочный металл Ni-Cr-Mo-W-Nb-Ti на основе никеля для сварки плакированной стали с пределом текучести сварного соединения до 650 МПа. Успешное внедрение высокопрочных углеродистых и низколегированных сталей в подводном нефтегазовом оборудовании будет зависеть от разработки высокопрочных присадочных металлов и новых процедур сварки.

Сварной шов обладает определенными механическими свойствами, наиболее важными из которых обычно являются прочность и ударная вязкость. Теория связи между микроструктурой и вязкостью была описана Дж. Нотт и соавторами [8].

3. Современное состояние магистральных трубопроводов в РФ

Сеть трубопроводов России включает в себя сотни тысяч километров газопроводов, нефтепроводов, продуктопроводов диаметрами от нескольких десятков сантиметров до труб диаметрами свыше 1000 мм. Протяженность магистральных трубопроводов РФ составляет более 220 тыс. км. Данные по протяженности трубопроводов представлены на рисунке 1.

Проведенный анализ состояния магистральных трубопроводных систем РФ показал, что эксплуатируются: 24 % — более 20 лет; 37 % — 10–20 лет; 7 % — преодолели

первая цифра — тыс. км, вторая цифра — % к общей протяженности

Рисунок 1. Протяженность магистральных трубопроводов в РФ

рубеж нормативного срока в 33 года (рисунок 2). В этой связи в настоящее время встает вопрос об организации большого количества ремонтно-восстановительных работ, в том числе сварных.

Рисунок 2. Возраст магистральных трубопроводов

Повышения производительности сварочно-монтажных работ можно добиться: внедрением новых энергоэффективных способов сварки; частичной или полной заменой имеющегося сварочного оборудования; применением инновационных сварочных материалов [9].

Для строительства трубопроводов в РФ применяют трубы стальные бесшовные, электросварные прямо- и спирально-шовные, изготовленные в основном из низколегированных сталей, в том числе в термически и термомеханически упроченном состоянии марок 17ГС, 17Г1С, 10Г2БТЮ, 10Г2ФБЮ, 08ГБФТЮ, 10Г2ФБ, 13ГС-У, 08Г2Т-У и др. [10].

Трубы, поступающие на полевые сварочные базы, соединяют в секции длиной 24–36 м, транспортируют на трассу и сваривают в плети.

Сварные соединения имеют требуемые механические свойства при создании непрерывного оплавления в течение 70–90 с с затратой мощности 2,0–2,5 кВт/см² и осадкой нагретых концов труб со скоростью 10–15 мм/с. Для контактной стыковой сварки оплавлением предназначены установки типа ТКУС, ТКУП, ПАУ, БТС, ССТ.

4. Инновационные сварочные технологии

Для совершенствования сварочного процесса проводят научные исследования и моделирование процесса. Так, в работе [11] движение расплавленного металла на конце проволоки при дуговой сварке под флюсом было снято высокоскоростной видеокамерой. Был проведен эксперимент с физическим моделированием для переноса металла. Комбинируя высокоскоростные видеоролики для эксперимента по сварке и физическому моделированию, предполагается, что может быть три режима переноса металла с увеличением сварочного тока.

В патентах [12–14] исследуют новые методики сварочного процесса. Так, в патенте [13] предложен способ, в котором каждый из источников питания в дуговой сварке используется в общем сварном соединении. Такая система минимизирует дуговые помехи.

Электрические свойства являются ключевым фактором, определяющим характеристики дуги. В исследовании [15] распределение электрических свойств сварочной плазменной дуги было исследовано с помощью

нового метода двойных активных зондов. Эксперименты проводились с различными положениями и поляризациями двух активных зондов в столбе плазменной дуги, чтобы учесть распределение электрической проводимости в столбе дуги и влияние направления тока. Тенденция радиальной электропроводности в различных сечениях столба дуги может быть получена путем расчета.

В работе [16] представлена модель бимодального источника тепла в описании температурного поля. Электрическая дуга рассматривалась как источник тепла, тепло которого было разделено: часть тепла передается при прямом воздействии электрической дуги, а другая часть тепла передается сварному шву расплавленным материалом электрода.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Responding to the Dual Challenge. London: British Petroleum, 2019. 84 p. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/sustainability/group-reports/bp-sustainability-report-2018.pdf> (дата обращения: 17.01.2020).
2. Vandan S.A., Gao L., Garg A., Kavitha P., Dhivya-sri G., Rahul S.G. *Interdisciplinary Treatment to Arc Welding Power Sources*. Singapore: Springer Singapore, 2019. 179 p. DOI: 10.1007/978-981-13-0806-2.
3. Svensson L.E. *Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds*. London: Routledge, 2017. 256 p.
4. Iannuzzi M., Barnoush A., Johnsen R. *Materials and Corrosion Trends in Offshore and Subsea Oil and Gas Production // NPJ Materials Degradation*. 2017. Vol. 1. No. 1. P. 1–11. DOI: 10.1038/s41529-017-0003-4.
5. Beaugrand V.C.M., Smith L.S., Gittos M.F. *Hydrogen Embrittlement of 8630M/625 Subsea Dissimilar Joints: Factors that Influence the Performance // Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Materials of ASME 2009 28th International Conference*. Honolulu, Hawaii, USA. 2009. P. 227–236. DOI: 10.1115/OMAE2009-80030.
6. Hartbower C.E., Pellini W.S. *Explosion Bulge Test Studies of the Deformation of Weldments // Welding Journal*. 1951. Vol. 30. No. 6. P. 307S–318S.
7. Mannan M.A., Golihue R., Kiser S., McCoy S.A., Phillipp J. *A New Nickel Alloy Filler Metal Designed for Welding High Strength ID-Clad Steels // Materials of EUROCORR*. Montpellier, France. 2016. URL: <http://eurocorr.efcweb.org/2016/abstracts/9/50697.pdf> (дата обращения: 15.10.2019).
8. Knott J.F. *Fundamentals of Fracture Mechanics*. Cassino: Gruppo Italiano Frattura, 1973. 273 p.
9. Рыбин В.А., Иванов В.А. Проблемы повышения энерго- и ресурсоэффективности при сооружении и реконструкции магистральных трубопроводов // *Экспозиция нефть газ*. 2013. № 7 (32). С. 60–62.
10. Корчемкин А.Е. Современное состояние сварки магистральных трубопроводов // *Записки Горного института*. 2004. Т. 157. С. 175–177.

Выводы

Наиболее перспективным способом сварки при сооружении и ремонте магистральных трубопроводов является дуговая сварка покрытыми электродами. Как правило, при полуавтоматической сварке стыков секций магистральных трубопроводов в качестве электрода применяется проволока сплошного сечения и защитный газ. Повышения производительности сварочно-монтажных работ можно добиться:

- внедрением новых энергоэффективных способов сварки;
- частичной или полной заменой имеющегося сварочного оборудования;
- применением инновационных сварочных материалов

11. Li K., Wu Z., Zhu Y., Liu C. *Metal Transfer in Submerged Arc Welding // Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 244. P. 314–319. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.02.004.
12. Patent 8963045 USA. *Non-Linear Adaptive Control System and Method for Welding* / S.R. Peters, B.E. Fulmer. 2015.
13. Patent 9283635 USA. *Synchronized Hybrid Gas Metal Arc Welding with TIG/Plasma Welding* / S.R. Peters. 2016.
14. Patent 14954124 USA. *Welding System and Method for Shielded Welding Wires* / M.T. Klegin, C. Haven. 2017.
15. Chen S., Zhang R., Jiang F., Dong S. *Experimental Study on Electrical Property of Arc Column in Plasma Arc Welding // Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 31. P. 823–832. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.12.028.
16. Winczek J., Gawronska E. *The Modeling of Heat Affected Zone (HAZ) in Submerged Arc Welding (SAW) Surfacing Steel Element // Metalurgija*. 2016. Vol. 55. No. 2. P. 225–228.

REFERENCES

1. Responding to the Dual Challenge. London, British Petroleum, 2019. 84 p. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/sustainability/group-reports/bp-sustainability-report-2018.pdf> (accessed 17.01.2020).
2. Vandan S.A., Gao L., Garg A., Kavitha P., Dhivya-sri G., Rahul S.G. *Interdisciplinary Treatment to Arc Welding Power Sources*. Singapore, Springer Singapore, 2019. 179 p. DOI: 10.1007/978-981-13-0806-2.
3. Svensson L.E. *Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds*. London, Routledge, 2017. 256 p.
4. Iannuzzi M., Barnoush A., Johnsen R. *Materials and Corrosion Trends in Offshore and Subsea Oil and Gas Production. NPJ Materials Degradation*, 2017, Vol. 1, No. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41529-017-0003-4.
5. Beaugrand V.C.M., Smith L.S., Gittos M.F. *Hydrogen Embrittlement of 8630M/625 Subsea Dissimilar*

Joints: Factors that Influence the Performance. *Materials of ASME 2009 28th International Conference «Ocean, Offshore and Arctic Engineering»*. Honolulu, Hawaii, USA, 2009, pp. 227-236. DOI: 10.1115/OMAE2009-80030.

6. Hartbower C.E., Pellini W.S. Explosion Bulge Test Studies of the Deformation of Weldments. *Welding Journal*, 1951, Vol. 30, No. 6, pp. 307S-318S.

7. Mannan M.A., Golihue R., Kiser S., McCoy S.A., Phillipp J. A New Nickel Alloy Filler Metal Designed for Welding High Strength ID-Clad Steels. *Materials of EUROCORR*. Montpellier, France, 2016. URL: <http://eurocorr.efcwweb.org/2016/abstracts/9/50697.pdf> (accessed 15.10.2019).

8. Knott J.F. *Fundamentals of Fracture Mechanics*. Cassino, Gruppo Italiano Frattura, 1973. 273 p.

9. Rybin V.A., Ivanov V.A. Problemy povysheniya energo i resursoeffektivnosti pri sooruzhenii i rekonstruktsii magistral'nykh truboprovodov [The Problems of Increasing Energy and Resource Efficiency in Construction and Reconstruction of Trunk Pipelines]. *Ekspozitsiya nefi' gaz — Exposition Oil Gas*, 2013, No. 7 (32), pp. 60-62. [in Russian].

10. Korchemkin A.E. Sovremennoe sostoyanie svarki magistral'nykh truboprovodov [Current State of Trunk

Pipeline Welding]. *Zapiski Gornogo instituta — Journal of Mining Institute*, 2004, Vol. 157, pp. 175–177. [in Russian].

11. Li K., Wu Z., Zhu Y., Liu C. Metal Transfer in Submerged Arc Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, Vol. 244, pp. 314–319. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.02.004.

12. Peters S.R., Fulmer B.E. *Non-Linear Adaptive Control System and Method for Welding*. Patent USA, No. 8963045, 2015.

13. Peters S.R. *Synchronized Hybrid Gas Metal Arc Welding with TIG/Plasma Welding*. Patent USA, No. 9283635, 2016.

14. Klegin M.T., Haven C. *Welding System and Method for Shielded Welding Wires*. Patent USA, No. 14954124, 2017.

15. Chen S., Zhang R., Jiang F., Dong S Experimental Study on Electrical Property of Arc Column in Plasma Arc Welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, Vol. 31, pp. 823-832. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.12.028.

16. Winczek J., Gawronska E. The Modeling of Heat Affected Zone (HAZ) in Submerged Arc Welding (SAW) Surfacing Steel Element. *Metalurgija*, 2016, Vol. 55, No. 2, pp. 225–228.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ABOUT THE AUTHOR

Сизяков Михаил Игоревич, главный инженер, Акционерное общество «Топливная Компания ТВК», г. Жуковский, Московская область, Российская Федерация

Mikhail I. Sizyakov, Chief Engineer, Fuel Company TVK, Zhukovskiy, Moscow Region, Russian Federation

e-mail: mixsiz@yandex.ru