DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-3-135-142
УДК 622.692.4(204.1)

А.С. Собачкин (Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация)

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ СВАРОЧНЫХ РАБОТ НА ТРУБОПРОВОДАХ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПЕРЕКАЧИВАЕМЫХ СРЕД

Aleksandr S. Sobachkin (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa,
Russian Federation)

SAFETY OF WELDING WORKS ON PIPELINES UNDER TRANSPORTING MEDIUM PRESSURE

Введение

Проведение сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваем сред, вызвано необходимостью подключения вновь построенных участков, ремонта незначительных повреждений стенки, врезки вантузов для выпуска воздуха или перекачиваемого продукта. Сварочные работы при этом ведутся в контакте с перекачиваемой средой. Если среда является горючей или взрывоопасной, возникает проблема обеспечения безопасности сварочных работ, которая является основным критерием возможности данных работ. Поэтому исследование проблемы безопасности является актуальной задачей.

Цели и задачи

Обоснование научных принципов организации рабочего места. Анализ производственной деятельности для составления профессиограммы, которая содержит общую характеристику профессии и требования, предъявляемые к работнику и к его рабочему месту.

Результаты

Установлена зависимость предельной толщины стенки трубопровода от внутреннего давления перекачиваемой среды. Определена предельная (аварийная) ситуация, которая может возникнуть при сквозном проплавлении стенки трубопровода, содержащего различные горючие среды. Представлены предложения для обеспечения безопасности сварочных работ.

Background

Welding works on pipelines, which are under pressure of pumped medium, is caused by the need to connect newly constructed areas, repair minor wall damage, tie-in for air exhaust or pumped product. Welding works in this case are in contact with the pumped medium. If the medium is flammable or explosive, the welding safety problem arises, which is the main criterion for the possibility of these works. Therefore, the study of the problem of security is an urgent task.

Aims and Objectives

Investigate the main parameters of the technological process of welding operations on pipelines that are under pressure from various pumped medium (oil, petroleum products, natural gas) to ensure the these works safety. Establish the danger level of welding operations on pipelines pumping various flammable liquids. Develop recommendations for the welding operations safety.

Results

The dependence of the maximum wall thickness of the pipeline on the internal pressure of the pumped medium is established. The ultimate (emergency) situation is identified, which can occur during the through penetration of a pipeline wall containing various combustible medium. Proposals have been submitted to ensure the welding operations safety.

Ключевые слова: сварочные работы, давление, толщина стенки, перекачиваемые среды, безопасность, нефть, дизельное топливо, трубопровод, нефтепровод, газопровод

Key words: welding, pressure, wall thickness, pumped medium, safety, oil, diesel, pipeline, oil pipeline, gas pipeline

Сварочные работы на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, в настоящее время нашли широкое применение при эксплуатации и ремонте магистральных трубопроводов [1-13].

Сварочные работы на нефтепроводах системы ПАО «Транснефть», находящихся под давлением перекачиваемой нефти, проводятся с целью приварки разрезных тройников и патрубков для устройств, предназначенных для откачки перекачиваемой нефти из действующего нефтепровода, подключения новых участков нефтепроводов [2].

На газопроводах, находящихся под давлением транспортируемого газа, сварочные работы использовались также для приварки ремонтных конструкций (муфт) [3, 7].

За рубежом каждая компания отдельно решает вопросы с производством сварки на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред на основе своего опыта на конкретном объекте [14, 15].

Основная проблема данных работ - это обеспечение безопасности производственного персонала, так как при этом используется исключительно ручная электродуговая сварка.

Проблема безопасности обусловлена возможностью разрушения трубопровода в процессе сварки. Перекачиваемые среды (нефть, нефтепродукты, природные газы) являются пожароопасными и взрывоопасными веществами, находящиеся под давлением, могут отрицательно воздействовать на персонал, выполняющий данные работы.

Сварка является источником огня, приводящим к взрыву и возгоранию выходящей из трубопровода среды. Поэтому

существуют следующие *основные варианты* решения данной проблемы.

Первый - это проведение работ по приведению трубопровода в безопасное состояние.

Второй - это недопущение разрушения трубопровода в процессе сварки.

Выбор варианта зависит от технической возможности и экономической целесообразности каждого из вариантов. Приведение трубопровода в безопасное состояние производится удалением транспортируемой среды и соответствующей подготовкой внутренней полости трубопровода.

Горючее вещество должно быть удалено полностью. Внутри трубопровода не должно быть также пожароопасной или взрывоопасной газовой среды.

На магистральных трубопроводах это целесообразно, когда из эксплуатации выводятся значительные участки трубопровода. При этом проводятся работы по его опорожнению, промывке, пропарке, продувке. Трубопровод может быть заполнен нейтральной пожаробезопасной средой (например водой или азотом). Все эти работы связаны с использованием большого количества технических и материальных средств и должны быть экономически и технически обоснованы в каждом отдельном случае. Кроме того, данные работы связаны с выводом ремонтируемого участка из эксплуатации, что не всегда возможно.

Сварочные работы на трубопроводах без остановки перекачки дают большой экономический эффект, так как не приводят к значительным затратам и не влияют на технологический процесс перекачки по трубопроводу.

Основная цель работ по проведению сварки на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, это предотвращение разгерметизации в процессе сварки. Это достигается путём определения допустимой толщины стенки на месте проведения работ при сварке на стандартных параметрах режима сварки. Это, прежде всего, диаметр, тип покрытия электрода и сварочный ток. Сварочный ток определён для каждой марки и диаметра электрода в виде интервала, в котором возможна качественная сварка. Поэтому изменяться может в ограниченном интервале.

Основной параметр, который влияет на безопасность работ, это допустимая толщина стенки трубопровода на месте производства сварки, то есть такая толщина, которая не позволит разрушиться трубопроводу в процессе нагрева сварочной дугой.

При сварке возможны два вида разрушения трубопровода. Это разрушение в виде образования сквозного отверстия и разрушение в виде образования продольной трещины.

Сквозное отверстие в стенке трубопровода образуется от действия нормальных к поверхности трубы напряжений, которые в 30 раз меньше кольцевых (8 МПа и 240 МПа). Поэтому толщина стенки, при которой труба может разрушиться, значительно меньше, чем толщина стенки трубопровода, и составляет десятую долю миллиметра.

Предельная толщина стенки, при которой возможно безопасная сварка (D), будет являться суммой глубины проплавления данным электродом ($d_{пр}$) и рабочей толщины, которая будет противостоять внутреннему давлению ($d_{раб}$):

$$D = d_{пр} + d_{раб}.$$

Глубина проплавления для электродов с основным видом покрытия диаметром 3 мм максимально равна диаметру электрода. Наличие перекачиваемой среды уменьшает её вследствие теплоотвода средой.

Особенностью теплоотвода газовых сред является то, что он увеличивается с увеличением давления внутри трубопровода и увеличением скорости движения газа. Но

теплоотвод не должен уменьшать глубину проплавления до 1,0-1,5 мм, так как дальнейшее уменьшение глубины проплавления ведёт к уменьшению прочности сварного соединения.

Как показали исследования, проведённые в работе [1], при сварочных работах на нефтепроводах наличие нефти влияет незначительно на глубину проплавления по сравнению со сваркой на воздухе. Это связано с тем, что при температурах до 40 °С внутри нефтепровода на месте нагрева сварочной дугой образуется газовый пузырь.

Дальнейший термический сварочный цикл протекает в газовой среде, что уменьшает глубину проплавления до 10 %, так как температура нагрева и скорость охлаждения сварного шва практически такие же, что и при сварке на воздухе.

Для определения предельной «рабочей» толщины стенки были проведены исследования по сквозному проплавлению стенки труб, находящихся под давлением различных сред (воды, нефти, дизельного топлива). В процессе исследований изучались форма проплавленного отверстия и его размеры. Установлено, что отверстия, образованные на внутренней поверхности труб, имеют практически одинаковый диаметр (1,5-2,0 мм) и имеют следующий вид (рисунок 1).

Измерялась толщина стенки на краю проплавленного отверстия. Она составила 0,1 мм при внутреннем давлении 1,0 МПа и 0,8 мм при давлении 8,0 МПа (рисунок 2).

Как следует из полученных экспериментальных данных, зависимость имеет вид линейной функции. Поэтому была выбрана расчётная модель в виде отверстия, закрытого заглушкой. Получена следующая формула для расчёта зависимости толщины стенки от внутреннего давления:

$$h(p) = \frac{pr}{2\sigma^T},$$

где $h(p)$ - толщина стенки, м;

p - внутреннее давление, МПа;

r - радиус проплавленного отверстия равный 0,02 м;

σ^T - предел текучести металла при максимальной температуре нагрева (500 °С), равный 50,0 МПа.

Рабочая толщина стенки, измеряемая
у края проплавленного отверстия (x5)

Рисунок 1. Форма отверстия, возникающего в стенке трубопровода, находящегося под давлением, при сквозном проплавлении в процессе сварки (пятикратное увеличение)

1 - эксперимент;
2 - расчёт

Рисунок 2. Зависимость толщины стенки трубы у края проплавленного отверстия от внутреннего давления

Расчётная зависимость $h(p)$ от внутреннего давления хорошо совпадает с экспериментальными данными (рисунок 2).

При дальнейшем увеличении внутреннего давления до предела текучести металла труб (11,0 МПа) наблюдалось образование выпуклого участка стенки труб. При давлении 12,0 МПа после зажигания сварочной дуги на поверхности труб происходил разрыв трубы с образованием продольной трещины.

Можно сделать вывод, что при внутреннем давлении, приводящем к упругим напряжениям в стенке трубы, зависимость рабочей толщины стенки от давления незначительна (увеличение на 0,1 мм при повышении давления на 1,0 МПа) и на практике находится в пределах ошибки измерений. Поэтому любые расчёты данной величины не имеют практической значимости. Теплоотвод в перекачиваемую среду ведёт к уменьшению глубины проплавления, и поэтому его можно не учитывать, если он не уменьшает глубину проплавления до величины, влияющей на прочность сварного соединения, и не приводит к закалке металла сварного шва и стенки трубы.

При глубине проплавления 1,0 мм и рабочей толщине 1,0 мм предельная толщина стенки трубы при сварке труб, находящихся под максимальным давлением 8,0 МПа, составит 2,0 мм. Поэтому можно установить допустимую толщину стенки трубопровода, находящегося под давлением перекачиваемых сред при сварке, равную 4,0 мм независимо от давления до 8,0 МПа. При этом глубина проплавления составит 2,0 мм (сварка электродами с основным видом покрытия диаметром до 3,0 мм).

Запас прочности по толщине стенки составит 1,2 мм, то есть 150 % (предельная толщина по давлению - 0,8 мм). Учитывая возможность ошибки измерения, толщину стенки можно увеличить до 5 мм.

Образование отверстия небольшого диаметра связано с тем, что распределение теплового потока по сечению сварочной дуги имеет вид гауссовского распределения, то есть оно максимально на среднем небольшом участке нагрева определённым электродом. Для электрода диаметром 3 мм

эта область имеет диаметр 1,5-2,0 мм. Размеры отверстия не зависят от внутреннего давления, диаметра трубопровода и толщины стенки.

Сварочная дуга от электродов представляет собой иглу, которая практически равномерно нагревает стенку трубы до критической температуры в области диаметров не более 2 мм. Размягчённый металл затем выдавливается транспортируемой по трубопроводу средой, и сварочная дуга гаснет. Дальнейший нагрев стенки трубы прекращается.

На практике возможно грубое нарушение технологии подготовительных работ при сварке (недоверенность измерения толщины стенки, наличие внутренних дефектов), появление трещин при наличии несплавлений [10-12]. Поэтому безопасность сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, должна определяться видом аварийной ситуации, возникающей вследствие сквозного проплавления.

Был проведен ряд экспериментальных исследований, когда изучалась ситуация, возникающая в случае сквозного проплавления стенки трубы (стенда), находящейся под давлением различных сред: нефти, дизельного топлива, бензина, сжиженного газа.

Проведённые исследования показали, что при сквозном проплавлении трубопровода, находящегося под давлением нефти и дизельного топлива, из проплавленного отверстия появляется пламя в виде газового облака высотой до 40 см при давлении 2,0 МПа и до 20 см при давлении 6,0 МПа. Это обусловлено тем, что на внутренней поверхности трубопровода в области нагрева сварочной дугой возникает газовая область, размеры которой уменьшаются с увеличением давления.

В дальнейшем происходило незначительное (высотой до 50 см) фонтанирование нефти или дизельного топлива без его возгорания.

При прожоге стенки трубы, содержащей бензин и сжиженный газ, выходящая среда образует струю, которая горит в верхней

части. Возгорание возникает от нагретой в процессе сварки поверхности трубы.

Изучение опыта производства сварочных работ на газопроводах, транспортирующих природный газ, показало, что проплавление стенки газопровода приводит к образованию огненного факела.

Из приведённых данных следует, что сварочные работы на трубопроводах, находящихся под давлением нефти и дизельного топлива, не могут привести к отрицательным воздействиям на производственный персонал, производящий эти работы.

Если возникает аварийная ситуация при сварке, то её можно устранить без последствий для персонала.

Выводы

1. При сварке на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемой среды, внутреннее давление практически не влияет на толщину стенки трубопровода, при

которой может произойти сквозное проплавление стенки.

2. При производстве сварки на газопроводах и трубопроводах, транспортирующих бензин, сжиженный газ, случайное сквозное проплавление стенки в процессе сварки может привести к чрезвычайной ситуации.

3. Решение данной проблемы связано с разработкой оборудования и технологий, исключающих нахождение персонала в зоне сварочных работ, например использование технологии автоматической сварки.

4. Производство сварочных работ на нефтепроводах и трубопроводах, перекачивающих дизельное топливо и находящихся под давлением перекачиваемых сред, полностью отвечает требованиям безопасности производства работ. Сквозное проплавление стенки трубопровода в процессе сварки не может привести к чрезвычайной ситуации.

Список литературы

1. Собачкин А.С., Абсальмов Э.Р., Черданцев П.И. Определение допустимой толщины стенки трубопровода при проведении сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред // Науч.-инф. сб. «Транспорт и хранение нефти и углеводородного сырья». 2012. № 4. С. 48-50.
2. Технология производства работ на газопроводах врезкой под давлением, включая огневые работы: РД 51-00158623-09-95. М.: PAO «Газпром», 1995. 64 с.
3. РД 23.040.00-KTN-073-15. Вырезка и врезка катушек, соединительных деталей, запорной и регулирующей арматуры. Подключение участков магистральных трубопроводов. М.: ОАО «АК «Транснефть», 2015. 123 с.
4. Гумеров А.Г., Зайнуллин Р.С., Собачкин А.С., Давлетшина Ф.А. Восстановление работоспособности нефтепроводов с применением сварки // Обз. инф. Сер. Транспорт и хранение нефти. М.: ВНИИОЭНГ, 1989. 64 с.
5. Методика расчёта допустимого давления во время сварки при проведении ремонтных работ на действующем нефтепроводе с проектным давлением 6,3 МПа и 10 МПа. М.: ОАО «АК «Транснефть», 2007. 156 с.
6. РД 39-00147105-015-98. Правила капитального ремонта магистральных нефтепроводов. Уфа, 1998. 194 с.

References

1. Sobachkin A.S., Absalyamov E.R., Cherdantsev P.I. Opredelenie dopustimoi tolshchiny stenki truboprovoda pri provedenii svarochnykh rabot na truboprovodakh, nakhodyashchikhsya pod davleniem perekachivaemykh sred [Determination of Allowed Pipe Wall Thickness during Welding Operations on Pipeline under Pressure Fluid]. *Nauchno-informatsionnyi sbornik «Transport i khranenie nefti i uglevodorodnogo syr'ya» - Scientific and Information Collection «Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons»*, 2012, No. 4, pp. 48-50.
2. *Tekhnologiya proizvodstva rabot na gazoprovodakh vrezkoi pod davleniem, vklyuchaya ognevye raboty: RD 51-00158623-09-95* [The Technology of Producing Gas Pipeline Works with a Press-Fit, Including Fire Works: RD 51-00158623-09-95]. Moscow, RAO «Gazprom», 1995. 64 p.
3. *RD 23.040.00-KTN-073-15. Vyrezka i vrezka katushek, soedinitel'nykh detalei, zapornoj i reguliruyushchei armatury. Podklyuchenie uchastkov magistral'nykh truboprovodov* [RD 23.040.00-KTN-073-15. Cutting and Tie-In of Coils, Connecting Parts, Shut-Off and Control Valves. Connection of trunk Pipeline Sections]. Moscow, ОАО «АК «Транснефть», 2015. 123 p.
4. Gumerov A.G., Zainullin R.S., Sobachkin A.S., Davletshina F.A. Vosstanovlenie rabotosposobnosti nefteprovodov s primeneniem svarki [Restoration of the Efficiency of Oil Pipelines with the Use of Weld-

7. СТО Газпром 2-2.3-116-2007. Инструкция по технологии производства работ на газопроводах врезкой под давлением. М.: ИРЦ Газпром, 2007. 107 с.
8. Березин В.Л. Выбор технологии заправки каверн на магистральных нефтепроводах при капитальном ремонте // Изв. вузов «Нефть и газ». 1964. № 11. С. 34-37.
9. Бурак Я.Н., Галюк В.Х., Джарджиманов А.С. Разработка режимов заварки каверн магистральных нефтепроводов под давлением // РНСТ. Сер. «Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов». 1981. Вып. 1. С. 57-60.
10. Харисов Р.А., Кантемиров И.Ф. Расчётная оценка несущей способности конструктивных элементов в нефтяных резервуарах и трубопроводов с несплавлениями в сварных швах // Сб. тр. «Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья». 2012. № 3. С. 49-51.
11. Кантемиров И.Ф. Исследование напряжённого состояния в окрестности сплавления двух разнородных тел // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2010. Вып. 2 (80). С. 73-78.
12. Хасанов Р.Р., Султанмагомедов С.М. Напряженно-деформированное состояние и обеспечение надежности тройников подземных трубопроводов. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. 100 с.
13. СТО Газпром 2-2.2-137-2007. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов. Ч. II. М.: ИРЦ «Газпром», 2007. 104 с.
14. Blake M., Palfreuman I. Welding onto Lives Lines Influence of Internal Pressure during Welding and Preheat on Pipe Wall Failure // British Gas Report. 1977. Feb. 18. P. 83-91.
15. Bloem E. Cutting and Welding of Natural Gas Pipelines // Austral. Weld. J. 1987. Vol. 32, No. 1. P. 22-23.
- ing]. *Obzornaya informatsiya. Seriya «Transport i khranenie nefiti»* [Obz. inf. Ser. «Transport and Storage of Oil»]. Moscow, VNIIOENG, 1989. 64 p.
5. *Metodika rascheta dopustimogo davleniya vo vremya svarki pri provedenii remonnykh rabot na deist-vuyushchem nefteprovode s proektnym davleniem 6,3 MPa i 10 MPa* [Method For Calculating the Permissible Pressure during Welding while Performing Repair Work on the Operating Oil Pipeline with a Project Pressure of 6.3 MPa and 10 MPa]. Moscow, OAO «AK «Transneft», 2007. 156 p.
6. *RD 39-00147105-015-98. Pravila kapital'nogo remonta magistral'nykh nefteprovodov* [RD 39-00147105-015-98. Rules for Main Oil Pipelines Overhaul]. Ufa, 1998. 194 p.
7. СТО Газпром 2-2.3-116-2007. Инструкция по технологии производства работ на газопроводах врезкой под давлением [СТО Газпром 2-2.3-116-2007. Instruction for the Technology of Production Work on Gas Pipelines in a Pressurized Enclosure]. Moscow, IRTs Gazprom, 2007. 107 p.
8. Berezin V.L. Vybora tekhnologii zaplavki kavern na magistral'nykh nefteprovodakh pri kapital'nom remonte [Choice of Technology for Cavern Cavitation on Trunk Oil Pipelines during Overhaul]. *Izv. vuzov «Nef't' i gaz» - Proc. of Universities «Oil and Gas»*, 1964, No. 11, pp. 34-37.
9. Burak Ya.N., Galyuk V.Kh., Dzhardzhimanov A.S. Razrabotka rezhimov zavarki kavern magistral'nykh nefteprovodov pod davleniem [Development of Regimes for Welding Caverns of Main Oil Pipelines under Pressure]. *RNST. Ser. «Transport i khranenie nefiti i nefteproduktov» - RNST. Ser. «Transport and Storage of Oil and Oil Products»*, 1981, Issue 1, pp. 57-60.
10. Kharisov R.A., Kantemirov I.F. Raschetnaya otsenka nesushchei sposobnosti konstruktivnykh elementov v neftyanykh rezervuarakh i truboprovodov s nesplavleniyami v svarnykh shvakh [Calculation of the Bearing Capacity of Structural Elements in Oil Tanks and Pipelines with Non-Melting in Welded Seams]. *Sbornik trudov «Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya»* [Collection of Scientific Works «Transport and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbons»], 2012, No. 3, pp. 49-51.
11. Kantemirov I.F. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya v okrestnosti splavleniya dvukh raznorodnykh tel [Analysis of Stressed State in the Fusion Zone of Two Heterogeneous Steels]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2010, Issue 2 (80), pp. 73-78.
12. Khasanov R.R., Sultanmagomedov S.M. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i obespechenie nadezhnosti troinikov podzemnykh truboprovodov [Stress-Strain State and Reliability of Tees of Underground Pipelines]. Ufa, UGNTU Publ., 2013. 100 p.
13. СТО Газпром 2-2.2-137-2007. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов [СТО Газпром 2-2.2-137-2007. Instruction on Welding

Technologies for Field and Main Gas Pipelines Construction and Repair]. Ch. II. Moscow, IRTs «Gazprom», 2007. 104 p.

14. Blake M., Palfreuman I. Welding onto Lives Lines Influence of Internal Pressure during Welding and Preheat on Pipe Wall Failure. *British Gas Report*, 1977, Feb. 18, pp. 83-91.

15. Bloem E. Cutting and Welding of Natural Gas Pipelines. *Austral. Weld. J.*, 1987, Vol. 32, No. 1, pp. 22-23.

Автор

• Собачкин Александр Сергеевич, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Сооружение и ремонт газо-нефтепроводов и газонефтехранилищ»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: acc1955@mail.ru

The Author

• Sobachkin Aleksandr S., Candidate of Engineering Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Construction and Maintenance of Oil and Gas Pipelines and Storages Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: acc1955@mail.ru