ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

INCREASING THE RELIABILITY OF WELDED PIPELINE CONNECTIONS IN RESERVOIR PRESSURE MAINTENANCE SYSTEM

М. Я. Хабибуллин
Marat Ya. Khabibullin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет, филиал,
г. Октябрьский,
Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University, Branch,
Oktyabrskiy, Russian Federation

Р. И. Сулейманов
Rustem I. Suleymanov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет, филиал,
г. Октябрьский,
Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University, Branch,
Oktyabrskiy, Russian Federation

При строительстве внутрипромысловых трубопроводов для закачки воды в нагнетательные скважины и последующем их капитальном или текущем ремонте широко применяют электродуговую ручную сварку. При сооружении таких конструкций не уделяется надлежащее внимание проверке сварных швов на соответствие их геометрическим параметрам в процессе соединения труб на нефтяных промыслах, а также не выполняются технические мероприятия, повышающие прочность сварного соединения, что нередко приводит к созданию аварийных ситуаций, вызванных порывом внутрипромысловых водяных трубопроводов в системе поддержания пластового давления. В статье исследуется вопрос влияния наиболее часто встречающихся на практике дефектов сварных швов неразъемного соединения, образующихся в процессе наложения сварного шва при соединении трубопроводов встык посредством электродуговой ручной сварки, на прочностные характеристики сварного соединения исследованием состояния свариваемого материала труб вокруг околошовной зоны. В качестве исследуемого образца использовался образец стыкового сварного соединения с явными дефектами. Проведены измерения геометрических параметров сварного соединения с помощью стандартных средств и определена твердость околошовной зоны методом Роквелла в определенных областях с обоснованием режимов сварочного процесса. Установлена причина разупрочнения. Изменение геометрии области термического воздействия обусловлено скоплением присадочного материала при его расплавлении с одной стороны сварного шва при снижении скорости сварки. Даны рекомендации для профилактики разрушения сварных конструкций и предупреждения возникновения аварийных ситуаций в водяных трубопроводах.

During the field pipelines construction, electric arc manual welding is widely used for pumping water into injection wells and their subsequent overhaul or current repairs. When constructing such structures, due attention is not paid to checking welds for their geometric parameters in the process of pipe joining in the oil fields, and technical measures are not taken to increase the strength of the welded joint, which often leads to emergency situations caused by a rupture of infield water pipelines in reservoir pressure maintenance system.

The article investigates the issue of the influence of the most common practical defects of welds of a one-piece joint, formed during the applica-

Ключевые слова

околошовная зона;
кристаллическая решетка;
термическое воздействие;
сварной шов; температурный
перепад;
геометрия сварного соединения

Key words

heat affected area; crystal cell;
thermal exposure; weld;
temperature difference;
weld geometry

tion of a weld when connecting butt welds by electric arc manual welding, on the strength characteristics of a welded joint by examining the condition of the pipe material being welded around the weld zone. As a test sample, a butt weld sample with obvious defects was used. The geometric parameters of the welded joint were measured using standard means and the hardness of the heat-affected zone was determined by the Rockwell method in certain areas with justification of the welding process. The cause of weakening is established. The change in the geometry of the heat-affected region is due to the accumulation of filler material during its melting on one side of the weld with a decrease in the welding speed. Recommendations are given for the prevention of the destruction of welded structures and the prevention of emergency situations in water pipelines.

При строительстве внутрипромысловых трубопроводов для закачки воды в нагнетательные скважины и последующем их капитальном или текущем ремонте широко применяют электродуговую ручную сварку. При сооружении таких конструкций не уделяется надлежащее внимание проверке сварных швов на соответствие их геометрическим параметрам в процессе соединения труб на нефтяных промыслах, а также не выполняются технические мероприятия, повышающие прочность сварного соединения, что нередко приводит к созданию аварийных ситуаций, вызванных порывом водяных трубопроводов [1–3]. Следовательно, исследования этой научной работы направлены на повышение надежности сварных соединений трубопроводов в системе поддержания пластового давления, неоднократно происходящие в деятельности нефтяных компаний.

Статья рассматривает разновидность сварочного процесса, который основан на плавлении

материала труб при создании высокой температуры в электрической дуге [4, 5]. Исследования показывают, что область околошовного участка нагревается неравномерно по всей ширине (максимальная температура возникает в области перегрева $T \approx 1400\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Графическая зависимость, представленная на рисунке 1, демонстрирует области околошовного участка, отличающиеся по своей образующей кристаллической структуре с различными показателями зернистости в зависимости от действия [4]. На рисунке 2 изображена геометрия рассматриваемого сварного соединения. На рисунке 3 изображен образец исследования дефектного сварного соединения, на котором отчетливо видны искажения [5]. Определены следующие параметры сварочного режима [4]:

- скорость сварки;
- напряжение $U = 20\text{ В}$;
- сварочный ток.

Рисунок 1. Область термического воздействия

Рисунок 2 Геометрия рассматриваемого сварного соединения

Рисунок 3. Образец дефектного сварного соединения

Для определения размеров рассматриваемых областей термического воздействия проводятся замеры методом Роквелла твердости

сварного соединения на определенных участках [6, 7]. Полученные данные отображены в таблице 1.

Таблица 1. Значения показаний твердости

№ замера	1	2	3	4	5	6
Левая сторона	21 HRC	18 HRC	17 HRC	22 HRC	24 HRC	27 HRC
Правая сторона	21 HRC	17 HRC	22 HRC	23 HRC	24 HRC	26 HRC

25HRC — твердость основного материала

По этим данным видно, что показания замеров № 2 и № 3 не совпадают, наблюдается снижение показаний с левой стороны. Геометрические параметры области термического воздействия изображены на рисунке 4, которые указывают на увеличение размеров зоны перегрева. Виной этому является изменение теплопроводности материала труб в резуль-

тате его перекристаллизации, что способствовало передаче ему избыточного количества тепловой энергии, награвшей материал труб до температуры значительно выше 830–850 °С [8, 9], обратив его в расплавленное состояние с дальнейшим охлаждением на открытом воздухе (искусственный процесс нормализации).

Рисунок 4. Геометрические параметры области термического воздействия

Теплопроводность материала труб зависит от размера зерен кристаллической решетки. Уменьшение размеров зерен снижает теплопроводность. Первоначально образовавшаяся теплота при распространении от эпицентра электрической дуги имеет меньшее сопротивление при прохождении крупнозернистой структуры, что вызвано высокой теплопроводностью.

На рисунке 5 изображена зависимость, отражающая способность различной зернистой структуры материала труб передавать тепловую энергию в рассматриваемых областях термического воздействия по разные стороны сварного шва.

В результате различные области материала труб имеют разный температурный нагрев, но

полностью конечная структура материала труб формируется при $t = 723\text{ }^{\circ}\text{C}$. Периферийные участки отображают участки, имеющие значительный рост зерен (рисунок 5). Отличительная особенность области перегрева в том, что начало остывания материала труб в рассматриваемой области начинается с максимального показания по сравнению с другими областями, кристаллизация которых происходит при самой низкой температуре (кривая охлаждения красного цвета). Из этого следует, что максимальный температурный перепад образуется в области перегрева, что создает условие к укрупнению структуры кристаллической решетки (рисунок 6) [10].

Рисунок 5. Способность материала труб к передаче тепловой энергии в зависимости от зернистости структуры

Рисунок 6. Диаграмма Fe — Fe₃C с указанием кривых охлаждения участков области термического воздействия

Таким образом, причиной разупрочнения сварного шва является увеличение ширины зоны перегрева. При уменьшении скорости движения электрода происходит перегрев металла с последующим изменением его теплопроводности в большую сторону. Зона перегрева имеет укрупненную зерновую структуру, вызванную излишней передачей тепла вследствие наплыва присадочного материала. Результаты исследования показывают, что даже незначительное уменьшение скорости электродуговой сварки приводит к увеличению ширины наиболее опасного участка области термического воздействия в несколько раз [11, 12]. На таком хрупком участке области термического воздействия размеры зерен значительно превышают размеры зерен металла, не входящего в данный участок, что увеличивает риск разрушения сварного соединения.

Обычно на нефтегазовых промыслах России не уделяется необходимого внимания исправлению и предотвращению ошибок, которые допускает сварщик при ручной электродуговой сварке. Для профилактики дефектов сварных соединений предлагается проводить следующие методы контроля:

— наружный контроль сварного соединения и проверка геометрических параметров шва;

— физические методы исследования сварного шва (ультразвуковой, магнитографический, гамма- и рентгенопросвечивание и др.);

— испытание внутривидеоскопических водяных трубопроводов, находящихся под давлением (до 18,0 МПа), на плотность и прочность газовым, гидравлическим или пневматическим давлением;

— испытание трубопроводов, швы которых должны быть герметичными, на плотность с применением керосина, сжатых газов, вакуум-камер, аммиака, а также газоэлектрических течеискателей.

Выводы

Для снижения остаточных напряжений, обрывающих при проведении сварочных работ, на практике непосредственно после сварки используются следующие способы обработки сварных швов и соединений: термические, механические, термомеханические. Для предотвращения появления коррозионных явлений на сварных конструкциях необходимо проводить механическую обработку сварных швов для удаления оставшегося шлака, а также использовать различные защитные покрытия, например грунтовую краску.

Проведение комплекса мероприятий, направленных на предупреждение разрушения сварных соединений трубопроводов в системе поддержания пластового давления, является целесообразным, так как при порыве трубопровода происходит потеря сточной воды, ощутим ущерб окружающей среде, нагнетательные скважины простаивают в период ремонтных работ.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хабибуллин М.Я., Сидоркин Д.И. Определение параметров колебаний колонны насосно-компрессорных труб при импульсной закачке жидкостей в скважину // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2016. Т. 3. № 3. С. 27–32. DOI: 10.5510/OGP20160300285.

2. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Selection of Optimal Design of a Universal Device for Nonstationary Pulse Pumping of Liquid in a Reservoir Pressure Maintenance System // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54. Issue 3–4. P. 225–232. DOI: 10.1007/s10556-018-0467-2.

3. Хабибуллин М.Я. Исследование процессов, происходящих в колонне труб при устьевой импульсной закачке жидкости в скважину // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 6. С. 34–39. DOI: 10.17122/ngdolo-2018-6-34-39.

4. Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Кузеев И.Р. Исследования состояния сварного соединения металла по параметрам деформационного и коррозионного рельефа поверхности // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2017. Т. 9. № 5. С. 98–115. DOI: 10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115. URL: http://www.nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-5-2017/98-115.pdf (дата обращения: 23.04.2019).

5. Зернов В.В., Зайцев М.Б. Поле напряжений в околошовной зоне сварных соединений // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 1. С. 136–143.

6. Хаустов С.В., Кузьмин С.В., Лысак В.И., Федянов Е.А. Расчетно-экспериментальная методика определения температурных полей в околошовной зоне при сварке взрывом // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. Т. 3. № 3 (41). С. 50–57.

7. Mishurina O.A., Mullina E.R., Chuprova L.V., Ershova O.V., Chernyshova E.P., Permyakov M.B., Krishan A.L. Chemical Aspects of Hydrophobization Technology for Secondary Cellulose Fibers at the Obtaining of Packaging Papers and Cardboards // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. No. 24. P. 44812–44814.

8. Efimenko L.A., Semin E.E. Effects of Weld Shape and Defect Size on the Stress and Strain in a Welded Joint to a Vertical Steel Vessel // Chemical and Petroleum Engineering. 2006. Vol. 42. No. 9–10. P. 538–542.

9. Zhiyong L., Bao W., Jingbin D. Detection of GTA welding quality and disturbance factors with spectral signal

of arc light // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. No. 10. P. 4867–4873.

10. Акулов А.И., Алехин В.П., Ермаков С.И. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки. М.: Машиностроение, 2003. 560 с.

11. Хромченко Ф.А. Справочное пособие электросварщика. М.: Машиностроение, 2003. 416 с.

12. Чернышов Г.Г. Технология электрической сварки плавлением. М.: Издательский центр «Академия». 2006. 448 с.

REFERENCES

1. Khabibullin M.Ya., Sidorkin D.I. Opredelenie parametrov kolebaniy kolonny nasosno-kompressornykh trub pri impul'snoi zakachke zhidkosti v skvazhinu [Determination of Tubing String Vibration Parameters under Pulsed Injection of Fluids into the Well]. *Nauchnye trudy NIPi Neftegaz GNKAR — SOCAR Proceedings*, 2016, Vol. 3, No. 3, pp. 27–32. DOI: 10.5510/OGP20160300285 [in Russian].

2. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Selection of Optimal Design of a Universal Device for Nonstationary Pulse Pumping of Liquid in a Reservoir Pressure Maintenance System. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 54, Issue 3–4, pp. 225–232. DOI: 10.1007/s10556-018-0467-2.

3. Khabibullin M.Ya. Issledovanie protsessov, proiskhodyashchikh v kolonne trub pri ust'voi impul'snoi zakachke zhidkosti v skvazhinu [Research of Processes in a Pipe String at a Wellhead Pulse Injection of Liquid to a Well]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 6, pp. 34–39. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39 [in Russian].

4. Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Kuzeev I.R. Issledovaniya sostoyaniya svarnogo soedineniya metalla po parametram deformatsionnogo i korrozionnogo rel'efa poverkhnosti [Research of state of metal welded joint by deformation and corrosion surface projection parameters]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyi internet-zhurnal — Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal*, 2017, Vol. 9, No. 5, pp. 98–115. DOI: 10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115. URL: http://www.nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-5-2017/98-115.pdf (accessed 23.04.2019). [in Russian].

5. Zernov V.V., Zaitsev M.B. Pole napryazhenii v okoloshovnoi zone svarnykh soedinenii [The Stress Field in the Heat-Affected Zone of Welded Joints]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo — Regional Architecture and Engineering*, 2014, No. 1, pp. 136–143. [in Russian].

6. Khaustov S.V., Kuz'min S.V., Lysak V.I., Fedyanov E.A. Raschetno-eksperimental'naya metodika opredeleniya temperaturnykh polei v okoloshovnoi zone pri svarke vzryvom [A Calculation-Experimental Method of Determination of Temperature Fields in the Heat-Affected Zone during Explosion Welding]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Izvestia VSTU*, 2008, Vol. 3, No. 3 (41), pp. 50–57. [in Russian].

7. Mishurina O.A., Mullina E.R., Chuprova L.V., Ershova O.V., Chernyshova E.P., Permyakov M.B., Krishan A.L. Chemical Aspects of Hydrophobization Technology for Secondary Cellulose Fibers at the Obtaining of Packaging Papers and Cardboards. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, Vol. 10, No. 24, pp. 44812–44814.

8. Efimenko L.A., Semin E.E. Effects of Weld Shape and Defect Size on the Stress and Strain in a Welded Joint to a Vertical Steel Vessel. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2006, Vol. 42, No. 9-10, pp. 538–542.

9. Zhiyong L., Bao W., Jingbin D. Detection of GTA Welding Quality and Disturbance Factors with Spectral Signal of Arc Light. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, Vol. 209, No. 10, pp. 4867–4873.

10. Akulov A.I., Alekhin V.P., Ermakov S.I. Tekhnologiya i oborudovanie svarki plavleniem i termicheskoi rezki [Technology and Equipment for Fusion Welding and Thermal Cutting]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2003. 560 p. [in Russian].

11. Khromchenok F.A. Spravochnoe posobie elektrosvarshchika [Reference Allowance of the Electric Welder]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2003. 416 p. [in Russian].

12. Chernyshov G.G. Tekhnologiya elektricheskoi svarki plavleniem [Electric Fusion Welding Technology]. Moscow, Izdatel'skii tsentr «Akademiya» Publ., 2006. 448 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Хабибуллин Марат Яхиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Нефтепромысловые машины и оборудование», УГНТУ, филиал, г. Октябрьский, Российская Федерация

Marat Ya. Khabibullin, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oil and Gas Field Machines and Equipment Department, Branch, USPTU, Oktyabrskiy, Russian Federation

e-mail: m-hab@mail.ru

Сулейманов Рустэм Исхакович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Нефтепромысловые машины и оборудование», УГНТУ, филиал, г. Октябрьский, Российская Федерация

Rustem I. Suleymanov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Oil and Gas Field Machines and Equipment Department, Branch, USPTU, Oktyabrskiy, Russian Federation

e-mail: rustamsul@rambler.ru