
ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья
УДК 620.178.15

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОРПУСОВ НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Андрюшкин Александр Юрьевич;
Рустамова Машхура Умаровна.

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия.

✉ Кадочникова Елена Николаевна.

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии
А.В. Хрулёва, Санкт-Петербург, Россия

✉ vf10@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования по влиянию на качество сварных соединений ультразвуковой ударной обработки для обеспечения безопасности корпусов нефтегазового оборудования. Безопасность сварных корпусов нефтегазового оборудования определяется герметичностью сварных соединений. Нарушение герметичности сварного соединения приводит к взрывопожарной опасности. Низкое качество сварного соединения наблюдается в металле шва и на прилегающих к нему участках зоны термического влияния (участок неполного расплавления, участок перегрева). Здесь металл состоит из крупных зерен, а также действуют существенные растягивающие напряжения. Рассчитано распределение температуры металла в зоне термического влияния при сварке низкоуглеродистой стали. По значениям критической температуры диаграммы «железо-цементит» зона термического влияния разбита на участки, определены их размеры. Рассмотрено распределение остаточных напряжений в стыковом сварном соединении. Показано, что металл шва испытывает растягивающие остаточные напряжения. Экспериментально оценено влияние ультразвуковой ударной обработки на качество металла стыкового сварного соединения корпуса нефтегазового оборудования из стали 09Г2С. Качество металла сварного соединения определялось по измерениям его твердости непосредственно после сварки в области, подвергнутой ультразвуковой ударной обработке, и области, в которой такая обработка не проводилась. Результаты измерения твердости сварного соединения показали улучшение состояния металла после ультразвуковой ударной обработки. Твердость, характеризующая прочностные свойства металла, распределена равномерно по сварному соединению и соответствует твердости основного металла корпуса. Экспериментально установлено повышение качества сварного соединения в результате его ультразвуковой ударной обработки для обеспечения безопасности корпуса нефтегазового оборудования. Статья соответствует научному направлению 2.10.1 – Пожарная безопасность.

Ключевые слова: твердость, корпус нефтегазового оборудования, сварное соединение, зона термического влияния, ультразвуковая ударная обработка, остаточные напряжения, пожарная безопасность

Для цитирования: Андрюшкин А.Ю., Рустамова М.У., Кадочникова Е.Н. Обеспечение безопасности сварных соединений корпусов нефтегазового оборудования методом ультразвуковой ударной обработки // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 103–113.

Scientific article

ENSURING THE SAFETY OF WELDED JOINTS OF OIL AND GAS EQUIPMENT HOUSINGS BY ULTRASONIC SHOCK TREATMENT

Andryushkin Aleksander Yu.;

Rustamova Mashchura U.

Baltic state technical university «VOENMEH» of D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russia.

✉ Kadochnikova Elena N.

Military academy of logistics named after army general A.V. Khrulev, Saint-Petersburg, Russia

✉ vf10@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of a study on the impact of ultrasonic shock treatment on the quality of welded joints to ensure the safety of oil and gas equipment housings. The safety of welded housings of oil and gas equipment is determined by the tightness of the welded joints. Violation of the tightness of the welded joint leads to an explosion and fire hazard. The poor quality of the welded joint is observed in the weld metal and in the adjacent areas of the thermal influence zone (incomplete melting area, overheating area). Here the metal consists of large grains, and there are also significant tensile stresses. The distribution of metal temperature in the zone of thermal influence during welding of low-carbon steel is calculated. According to the values of the critical temperature of the «iron-cementite» diagram, the zone of thermal influence is divided into sections, their sizes are determined. The distribution of residual stresses in a butt welded joint is considered. It is shown that the weld metal experiences tensile residual stresses. The effect of ultrasonic shock treatment on the quality of the butt weld metal of the casing of oil and gas equipment made of steel 09G2S has been experimentally evaluated. The quality of the metal of the welded joint was determined by measurements of its hardness immediately after welding in the area subjected to ultrasonic shock treatment and the area in which such treatment was not carried out. The results of measuring the hardness of the welded joint showed an improvement in the condition of the metal after ultrasonic shock treatment. The hardness characterizing the strength properties of the metal is distributed evenly over the welded joint and corresponds to the hardness of the base metal of the housing. The quality of the welded joint has been experimentally improved as a result of its ultrasonic shock treatment to ensure the safety of the casing of oil and gas equipment. The article corresponds to the scientific direction 2.10.1 – Fire safety.

Keywords: hardness, oil and gas equipment housing, welded joint, thermal influence zone, ultrasonic shock treatment, residual stresses, fire safety

For citation: Andryushkin A.Yu., Rustamova M.U., Kadochnikova E.N. Ensuring the safety of welded joints of oil and gas equipment housings by ultrasonic shock treatment // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 2 (66). P. 103–113.

Введение

При изготовлении корпусов нефтегазового оборудования широко применяется сварка. Безопасность корпусов нефтегазового оборудования зависит от герметичности сварных соединений. Сварное соединение включает металл шва (МШ), зону термического влияния (ЗТВ) и основной металл (ОМ). Низкое качество в сварном соединении, чаще всего, наблюдается в металле шва и прилегающих к нему участках зоны термического влияния, что обусловлено высокими остаточными напряжениями и наличием допустимых дефектов. При сварке остаточные напряжения возникают из-за перехода металла из жидкого в твердое состояние, этот переход сопровождается усадкой металла. При эксплуатации находящегося под давлением низкокачественного корпуса нефтегазового оборудования может произойти разгерметизация сварного соединения, что приведет к созданию взрывопожарной опасности. Особенно способствуют образованию и развитию трещин в сварном соединении растягивающие

напряжения. Поэтому задача обеспечения безопасности корпусов нефтегазового оборудования за счет повышения качества сварных соединений актуальна [1–8].

Для повышения качества корпусов нефтегазового оборудования применяют различные методы снижения остаточных напряжений в сварных соединениях, такие как термообработка (подогрев, отпуск, отжиг) и вибрационная обработка. Эти методы имеют ряд ограничений, связанных с габаритами свариваемого изделия, применяемого способа сварки и метода снятия остаточных напряжений.

Высокой универсальностью обладает метод ультразвуковой ударной обработки (УУО), обеспечивающий эффективное снятие и стабилизацию сварочных напряжений. При УУО происходит пластическое деформирование поверхности металла сварного шва и ЗТВ, что приводит к поверхностному наклепу. УУО обеспечивает смену растягивающих напряжений на сжимающие напряжения в сварном соединении.

В ряде работ [9–12] отмечено, что УУО повышает качество и безопасность сварного соединения за счет:

- снижения остаточных напряжений в сварном шве и ЗТВ;
- получения поверхностного упрочненного слоя с повышенным сопротивлением к образованию трещин;
- измельчения зерен металла в сварном шве.

Изменение свойств сварного соединения корпуса нефтегазового оборудования до и после УУО можно оценить косвенно, по его твердости. По твердости металла сварного соединения можно определить его прочностные и пластические свойства.

Целью исследования является экспериментальная оценка повышения качества сварного соединения в результате его УУО для обеспечения безопасности корпуса нефтегазового оборудования.

Задачи исследования:

1. Провести анализ остаточных напряжений и механических свойств металла в сварном соединении низкоуглеродистой стали.
2. Экспериментально оценить влияние УУО на качество металла сварного соединения корпуса нефтегазового оборудования.

Методы исследования

Для снятия и благоприятного перераспределения остаточных напряжений в сварном соединении корпуса нефтегазового оборудования был применен метод УУО комплексом «Шмель-1».

Технологический комплекс «Шмель» состоит из ультразвукового инструмента, источника питания, соединительных элементов и предназначен для упрочняющей обработки сварных соединений металлоконструкций методом ударного деформирования на ультразвуковой частоте. УУО сварного соединения должна проводиться непосредственно после сварки изделия с применением входящего в комплект данного комплекса инструмента с расположенными в ряд иглами-ударниками.

О прочностных характеристиках металла сварного соединения (предел прочности при растяжении или временное сопротивление σ_b , предел текучести σ_t , модуль упругости E , предел выносливости σ_{-1}) можно судить по измерениям его твердости. Метод измерения твердости материала широко распространен в практике, так как он отличается простотой процедуры и быстротой проведения испытаний. Главным преимуществом этого метода является непосредственное измерение твердости конкретного сварного шва без его разрушения.

Для фактической оценки твердости металла сварного соединения был применен метод Бринелля (ГОСТ 9012), основанный на внедрении в металл индентора в виде стального шарика. Использовался электронный переносной твердомер ТЭМП-2 динамического действия, предназначенный для экспрессного измерения твердости сталей, сплавов и их сварных

соединений по шкалам Бринелля, Роквелла, Шора, Виккерса. Поверхность сварного соединения в месте измерения твердости обрабатывали до шероховатости 2,5 мкм [9–12].

Остаточные напряжения и механические свойства металла в сварном соединении

При сварке плавлением под воздействием источника теплоты расплавляются кромки основного (свариваемого) металла и электродный металл, подаваемый в сварочную ванну, которая перемещается вместе с источником теплоты. Сварочная ванна условно может быть разделена на две части: головную и хвостовую. В головной части происходит плавление, а в хвостовой – кристаллизация металла и формирование шва.

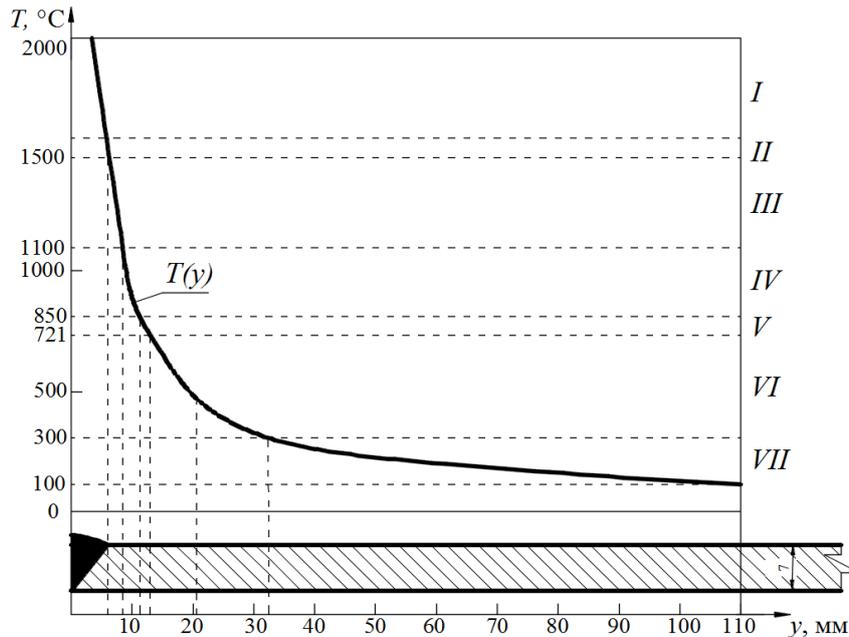


Рис. 1. Строение зоны термического влияния низкоуглеродистой стали: I – металл шва; II – участок неполного расплавления; III – участок перегрева; IV – участок нормализации; V – участок неполной перекристаллизации; VI – участок рекристаллизации; VII – участок синеломкости; T – температура металла; y – расстояние от оси сварного соединения

Вокруг нагретого металла шва возникает ЗТВ, строение и размеры которой зависят от химического состава и теплофизических свойств свариваемого металла, мощности и скорости движения источника теплоты, степени его концентрированности, других факторов. ЗТВ в зависимости от структурных изменений металла, происходящих в результате его нагрева, разделяют на участки (рис. 1). Для стали границы участков устанавливают по значениям критических температур диаграммы «железо-цементит». Температуру нагрева металла от линейного быстродвижущегося источника тепла можно вычислить по эмпирической формуле [8]:

$$T = \frac{0,484 \cdot \left(\frac{q_n}{2 \cdot \delta} \right)}{c_\gamma \cdot y} + 20, \quad (1)$$

где T – температура металла, °C; q_n – погонная энергия, кал/см; δ – толщина свариваемого металла, см; c_γ – объемная теплоемкость, кал/(см³·°C); y – расстояние от оси сварного соединения, см.

Расчет по формуле (1) при следующих исходных данных: $q_n=3\ 000$ кал/см; $\delta=0,7$ см; $c_\gamma=1,14$ кал/(см³·°C) показывает, что ЗТВ низкоуглеродистых сталей весьма велика и составляет порядка $y=110$ мм (рис. 1). Однако оказывающие решающее влияние на качество сварного соединения изменения структуры наблюдаются в металле шва и на участках ЗТВ, непосредственно прилегающих к нему, $y=20$ мм. Здесь при нагревании и охлаждении проходят полиморфные превращения металла, сопровождаемые упругими и пластическими деформациями, приводящие к возникновению значительных остаточных напряжений. Обычно МШ, участки неполного расплавления и перегрева имеют более низкие прочностные показатели по сравнению с ОМ, так как здесь формируется крупнозернистая структура металла, испытывающего значительные растягивающие остаточные напряжения. Поэтому для повышения качества сварного соединения необходима его обработка после сварки, обеспечивающая улучшение структуры металла – формирование мелкозернистой структуры.

Распределение остаточных напряжений в сварных соединениях весьма разнообразно и трудно поддается регламентации и классификации. Более или менее стабильный характер имеют остаточные напряжения в стыковых сварных соединениях (рис. 2). Опасны растягивающие остаточные напряжения, возникающие в МШ и прилегающих к нему участках ЗТВ: неполного расплавления и перегрева. Поэтому для снятия или формирования сжимающих остаточных напряжений необходима обработка МШ и ЗТВ [10–12].

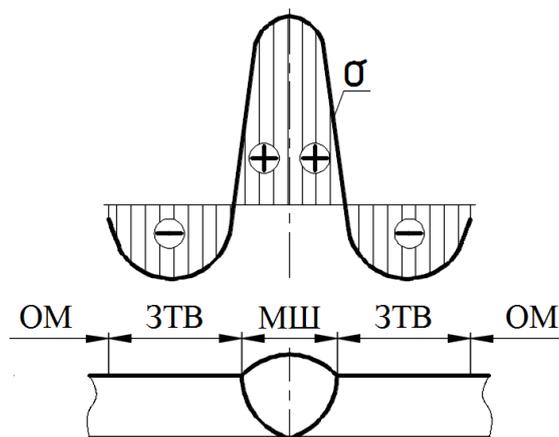
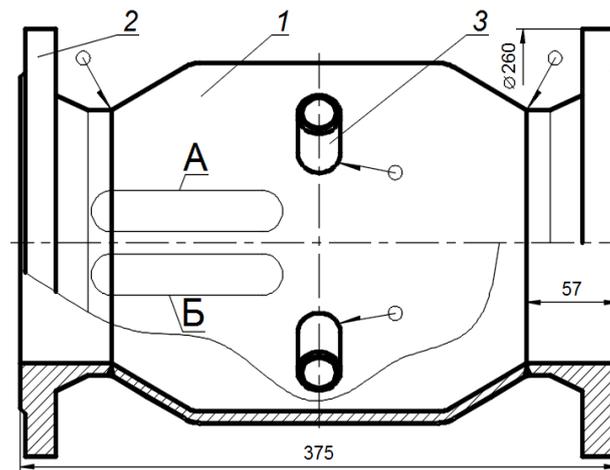


Рис. 2. Характерное распределение остаточных напряжений в поперечном сечении стыкового сварного соединения из низкоуглеродистой стали: σ – остаточные напряжения; МШ – металл шва; ЗТВ – зона термического влияния; ОМ – основной металл; плюс – растягивающие напряжения; минус – сжимающие напряжения

УУО металла шва и ЗТВ непосредственно после сварки способствует формированию мелкозернистой структуры металла, создает сжимающие остаточные напряжения, упрочняет поверхность сварного соединения за счет наклепа.

Влияние УУО на качество металла сварного соединения корпуса нефтегазового оборудования

Корпус нефтегазового оборудования обычно представляет собой сварную конструкцию, нагруженную внутренним давлением. Для соединения с подводящими и отводящими магистралями жидкостей и газов корпус содержит разнообразные фланцы, штуцера и патрубки. Рассмотрим цилиндрический корпус с коническими переходами, выполненными обжимом торцов трубы, к которому приварены фланцы и штуцера (рис. 3). Все детали изделия изготовлены из хорошо свариваемой стали 09Г2С. Перед сваркой металл обечайки с коническими переходами по проведенным измерениям имел твердость $HВ=1\ 315$ МПа.



А (без УУО); Б (после УУО)

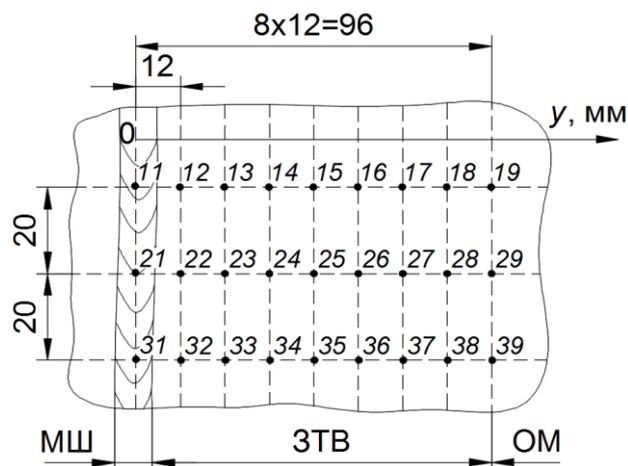


Рис. 3. Корпус: 1 – обечайка с коническими переходами; 2 – фланец; А – схема измерения твердости в области сварного соединения без УУО; Б – схема измерения твердости в области сварного соединения после УУО; у – расстояние от оси сварного соединения; 11–19, 21–29, 31–39 – точки измерения твердости

В результате воздействия источника теплоты в сварном соединении наблюдается изменение структуры металла, возникают остаточные напряжения, что выражается в изменении твердости металла. После УУО происходит улучшение структуры металла (измельчение зерен), благоприятно перераспределяются остаточные напряжения (превалируют сжимающие напряжения), создается упрочненный поверхностный слой, что также отражается на твердости металла сварного соединения. Таким образом, УУО повышает качество сварного соединения [9–12].

Для оценки влияния УУО на прочностные свойства металла проводились измерения твердости в двух областях стыкового сварного соединения фланца и обечайки корпуса: область «А» – без УУО, область «Б» – после УУО (рис. 3). Области «А» и «Б» расположены так, что включают в себя МШ и зону термического влияния сварного соединения. Толщина металла свариваемых деталей составляла $\delta=7$ мм.

Область «Б» стыкового сварного соединения непосредственно после сварки была подвергнута УУО комплексом «Шмель» со следующими технологическими параметрами: частота 22 кГц; мощность 630 Вт; амплитуда 35 мкм; скорость проведения обработки 2 м/мин.

Измерение твердости металла сварного соединения в областях «А» и «Б» проводились методом Бринелля с помощью переносного твердомера ТЭМП-2. В каждой области измерения твердости НВ осуществлялись в 27 точках (рис. 3). Точки расположены в три ряда, перпендикулярно оси сварного соединения, равномерно через 12 мм. Соответственно на определенном расстоянии y , отсчитываемого от оси сварного соединения, измерения твердости металла проводились в трех точках в области «А»: НВ1, НВ2, НВ3, затем вычислялось среднее значение твердости HV_{cp} . Аналогично измерения твердости металла осуществлялись в области «Б»: $HV1_{yuo}$, $HV2_{yuo}$, $HV3_{yuo}$, затем рассчитывалось среднее значение твердости $HV_{cp_{yuo}}$ (табл., рис. 4).

Таблица

Результаты измерения твердости металла сварного соединения в областях «А» и «Б» в точках 11–19; 21–29; 31–39 (рис. 3)

№ точки	y , мм	Твердость металла сварного соединения без УУО (область «А»)				Твердость металла сварного соединения после УУО (область «Б»)			
		НВ1, МПа	НВ2, МПа	НВ3, МПа	НВ _{ср} , МПа	НВ1 _{ууо} , МПа	НВ2 _{ууо} , МПа	НВ3 _{ууо} , МПа	НВ _{ср_ууо} , МПа
11, 21, 31	0	1 251	1 263	1 249	1 254	1 293	1 301	1 308	1 301
12, 22, 32	12	1 296	1 307	1 324	1 309	1 315	1 329	1 313	1 319
13, 23, 33	24	1 291	1 334	1 323	1 316	1 325	1 314	1 328	1 322
14, 24, 34	36	1 293	1 303	1 329	1 308	1 338	1 318	1 304	1 320
15, 25, 35	48	1 287	1 290	1 312	1 296	1 336	1 319	1 313	1 323
16, 26, 36	60	1 307	1 280	1 296	1 294	1 321	1 311	1 332	1 321
17, 27, 37	72	1 292	1 277	1 312	1 294	1 297	1 333	1 337	1 322
18, 28, 38	84	1 294	1 282	1 313	1 296	1 338	1 302	1 328	1 323
19, 29, 39	96	1 324	1 317	1 287	1 309	1 316	1 331	1 319	1 322

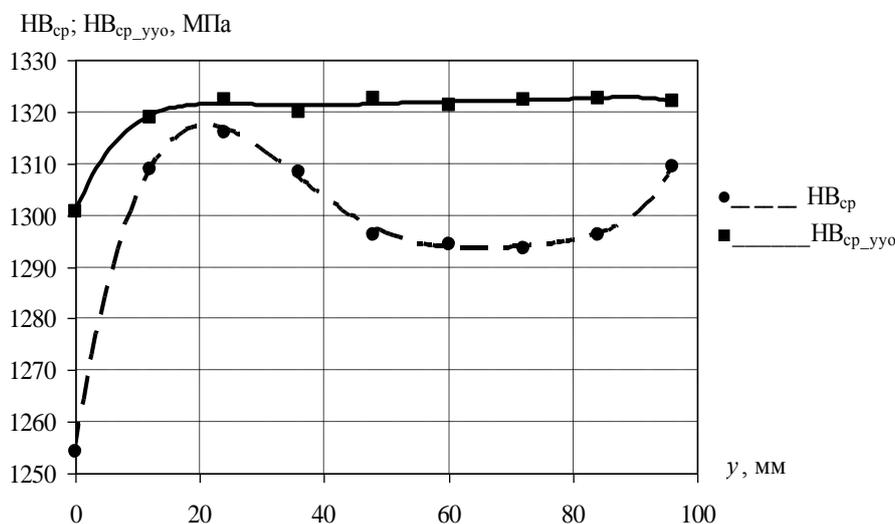


Рис. 4. Зависимость твердости металла сварного соединения в области «А» (без УУО) HV_{cp} и в области «Б» (после УУО) $HV_{cp_{yuo}}$ от расстояния y , отсчитываемого от оси сварного соединения y (рис. 3)

Анализ результатов измерений твердости металла в области «А» (без УУО) сварного соединения показывает, что она варьируется примерно на 5 % (рис. 4). Это обусловлено различной структурой металла и величиной остаточных напряжений в МШ и ЗТВ. Минимальная твердость наблюдается на оси сварного соединения в МШ $HV=1 254$ МПа, затем она резко возрастает и на участке нормализации достигает максимального значения

НВ=1 316 МПа, затем незначительно снижается до НВ=1 294 МПа и увеличивается, достигая твердости НВ=1 309 МПа, близкой к твердости ОМ корпуса. Полученные результаты говорят о работоспособности сварного соединения и его приемлемом качестве, при этом в МШ могут присутствовать существенные растягивающие остаточные напряжения, представляющие опасность при эксплуатации корпуса нефтегазового оборудования.

Измерения твердости металла в области «Б» (после УУО) сварного соединения показывают значительное улучшение состояния металла. Обусловленное УУО измельчение зерна и поверхностное упрочнение (наклеп) МШ и ЗТВ обеспечивает твердость сварного соединения на уровне НВ=1 320 МПа. Только в МШ наблюдается меньшая твердость НВ=1 301 МПа, то есть здесь твердость уменьшается на 1,5 % по сравнению с ЗТВ.

Сравнивая измерения твердости металла стыкового сварного соединения до и после УУО можно отметить, что твердость металла после обработки увеличилась на 1–4 %. При этом после УУО твердость металла, а следовательно, его прочностные и пластические свойства распределены равномерно по сварному соединению и соответствуют свойствам (твердости) ОМ.

Таким образом, экспериментально установлено, что УУО повышает качество сварного соединения корпуса: улучшается структура металла и благоприятно перераспределяются остаточные напряжения.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведен анализ остаточных напряжений и механических свойств металла в сварном соединении низкоуглеродистой стали. Рассмотрено строение ЗТВ низкоуглеродистой стали. Рассчитано распределение температуры в направлении перпендикулярном оси стыкового сварного соединения. В зависимости от температуры нагрева металла в ЗТВ выделены участки с различной структурой металла. Ухудшающие качество сварного соединения существенные структурные изменения металла, а также трансформация его свойств наблюдается в МШ, участке неполного расплавления и участке перегрева. В МШ стыкового сварного соединения возникают значительные растягивающие остаточные напряжения, которые способствуют развитию трещин.

Проведенный анализ показал, что после сварки необходима улучшающая состояние металла сварного соединения УУО, способствующая измельчению зерна, снижению остаточных напряжений и поверхностному упрочнению.

Экспериментально оценено влияние УУО на качество металла сварного соединения корпуса нефтегазового оборудования. Это влияние определялось при сравнении твердости металла сварного соединения в области «А» без УУО и в области «Б» после УУО. Результаты эксперимента показали рост твердости металла сварного соединения после УУО, при этом твердость металла, а следовательно, его прочностные и пластические свойства распределены равномерно по сварному соединению.

Цель исследования можно считать достигнутой – экспериментально установлено повышение качества сварного соединения в результате его УУО для обеспечения безопасности корпуса нефтегазового оборудования.

Заключение

По проведенному исследованию можно сделать следующие выводы:

1. Безопасность корпусов нефтегазового оборудования обеспечивается качественными сварными соединениями.
2. Снижение качества металла сварного соединения обусловлено его нагреванием до высокой температуры, что способствует формированию крупнозернистой структуры металла и возникновению существенных остаточных напряжений.

3. Твердость металла сварного соединения косвенно характеризует его прочностные и пластические свойства.

4. Повышению качества сварного соединения способствует проводимая непосредственно после сварки УУО, обеспечивающая улучшение структуры металла, снижение остаточных напряжений, поверхностное упрочнение.

Таким образом, УУО повышает качество сварного соединения, что обеспечивает надежность и безопасность корпусов нефтегазового оборудования.

Список источников

1. Sornette D., Maillart T., Kröger W. Exploring the limits of safety analysis in complex technological systems // *International journal of disaster risk reduction*. 2013. Vol. 6. P. 59–66. DOI: 10.1016/j.ijdr.2013.04.002.

2. Bauwens C.R., Chaffee J., Dorofeev S.B. Vented explosion overpressures from combustion of hydrogen and hydrocarbon mixtures // *International journal of hydrogen energy*. 2011. Vol. 36. Iss. 3. P. 2329–2336. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.04.005.

3. Quantification of oil spill risk / D.S. Etkin [et al.] // *Oil spill science and technology – Fingas M. (ed.)*. 2-nd ed. Cambridge, MA: Gulf professional publishing. 2017. P. 71–183. DOI: 10.1016/B978-0-12-809413-6.00002-3.

4. Vianello C., Maschio G. Quantitative risk assessment of the Italian gas distribution network // *Journal of loss prevention in the process industries*. 2014. Vol. 32. P. 5–17. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.07.004.

5. Thermal stress and deformation in moderately thick shells of revolution of functionally graded material under thermal impulsive loading / Sh. Takezono [et al.] // *Transactions of the Japan society of mechanical engineers. Series B 00066(00645)*. 2000. Vol. 66. № 645. P. 1060–1067.

6. Анализ отказов и повышение надежности полевых магистральных трубопроводов / Р.М. Зябиров [и др.] // *Технология нефти и газа*. 2019. № 2 (121). С. 45–48.

7. Комарицина В.Н., Сухорукова Н.Н. Исследования механики деформаций и разрушений и некоторые вопросы обеспечения безопасности и надежности трубопроводов с учетом особенностей технологического процесса // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2017. Т. 7. № 4. С. 116–119.

8. Копельман Л.А. Основы теории прочности сварных конструкций: учеб. пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Изд-во «Лань», 2010. 464 с.

9. Андрияшкин А.Ю., Кадочникова Е.Н., Рустамова М.У. Экспериментальное определение прочностных и пластических свойств корпусов нефтегазового оборудования по твердости и их влияние на взрывопожарную опасность // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2022. № 2 (62). С. 16–24.

10. Зарезин В.Е. Методика улучшения качества сварных швов ультразвуковой ударной обработкой с обоснованием оптимальных параметров упрочнения поверхностного слоя // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2016. № 4. С. 16–22.

11. Антонов А.А., Летуновский А.П. Снижение остаточных сварочных напряжений методом ультразвуковой ударной обработки // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. 2012. № 2 (30). С. 21–26.

12. Тажибаев А.Р., Тажибаева А.В., Бикбулатова Г.И. Методы выявления и снижения остаточных напряжений в сварных соединениях // *Современные материалы, техника и технологии*. 2021. № 5 (38). С. 45–53.

References

1. Sornette D., Maillart T., Kröger W. Exploring the limits of safety analysis in complex technological systems // *International journal of disaster risk reduction*. 2013. Vol. 6. P. 59–66. DOI: 10.1016/j.ijdr.2013.04.002.
2. Bauwens C.R., Chaffee J., Dorofeev S.B. Vented explosion overpressures from combustion of hydrogen and hydrocarbon mixtures // *International journal of hydrogen energy*. 2011. Vol. 36. Iss. 3. P. 2329–2336. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.04.005.
3. Quantification of oil spill risk / D.S. Etkin [et al.] // *Oil spill science and technology – Fingas M. (ed.)*. 2-nd ed. Cambridge, MA: Gulf professional publishing. 2017. P. 71–183. DOI: 10.1016/B978-0-12-809413-6.00002-3.
4. Vianello C., Maschio G. Quantitative risk assessment of the Italian gas distribution network // *Journal of loss prevention in the process industries*. 2014. Vol. 32. P. 5–17. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.07.004.
5. Thermal stress and deformation in moderately thick shells of revolution of functionally graded material under thermal impulsive loading / Sh. Takezono [et al.] // *Transactions of the Japan society of mechanical engineers. Series B 00066(00645)*. 2000. Vol. 66. № 645. P. 1060–1067.
6. Analiz otkazov i povyshenie nadezhnosti polevyh magistral'nyh truboprovodov / R.M. Zyabirov [i dr.] // *Tekhnologiya nefti i gaza*. 2019. № 2 (121). S. 45–48.
7. Komaricina V.N., Suhorukova N.N. Issledovaniya mekhaniki deformacij i razrushenij i nekotorye voprosy obespecheniya bezopasnosti i nadezhnosti truboprovodov s uchetom osobennostej tekhnologicheskogo processa // *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*. 2017. T. 7. № 4. S. 116–119.
8. Kopel'man L.A. *Osnovy teorii prochnosti svarnyh konstrukcij: ucheb. posobie*. 2-e izd., ispr. SPb.: Izd-vo «Lan'», 2010. 464 s.
9. Andryushkin A.Yu., Kadochnikova E.N., Rustamova M.U. Eksperimental'noe opredelenie prochnostnyh i plasticheskikh svojstv korpusov neftegazovogo oborudovaniya po tverdosti i ih vliyanie na vzryvopozharnuyu opasnost' // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2022. № 2 (62). S. 16–24.
10. Zarezin V.E. Metodika uluchsheniya kachestva svarnyh shvov ul'trazvukovoj udarnoj obrabotkoj s obosnovaniem optimal'nyh parametrov uprochneniya poverhnostnogo sloya // *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2016. № 4. S. 16–22.
11. Antonov A.A., Letunovskij A.P. Snizhenie ostatochnyh svarochnyh napryazhenij metodom ul'trazvukovoj udarnoj obrabotki // *Truboprovodnyj transport: teoriya i praktika*. 2012. № 2 (30). S. 21–26.
12. Tazhibaev A.R., Tazhibaeva A.V., Bikbulatova G.I. Metody vyyavleniya i snizheniya ostatochnyh napryazhenij v svarnyh soedineniyah // *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2021. № 5 (38). S. 45–53.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 31.01.2023; одобрена после рецензирования: 29.03.2023;
принята к публикации: 31.03.2023

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 31.01.2023; approved after review: 29.03.2023;
accepted for publication: 31.03.2023

Информация об авторах:

Андрюшкин Александр Юрьевич, заведующий кафедрой А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская, д. 1), кандидат технических наук, доцент, e-mail: Sascha1a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7812-069X>

Рустамова Машхура Умаровна, аспирант кафедры А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская, д. 1), <https://orcid.org/0000-0002-2513-3809>

Кадочникова Елена Николаевна, младший научный сотрудник 12-го научно-исследовательского отдела 1-го управления научно-исследовательского (организации материально-технического обеспечения) Научно-исследовательского института (военно-системных исследований материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 8), кандидат технических наук, доцент, e-mail: vf10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4577-390X>

Information about the authors:

Andryushkin Alexander Yu., head of the A2 department «Technologies of structural materials and production of rocket and space technology» of D.F. Ustinov Baltic state technical university «VOENMEH» (190005, Saint-Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya, 1), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: Sascha1a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7812-069X>

Rustamova Mashkhura U., postgraduate student of D.F. Ustinov Baltic state technical university «VOENMEH» (190005, Saint-Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya, 1), department A2 «Technologies of structural materials and Production of rocket and space technology», <https://orcid.org/0000-0002-2513-3809>

Kadochnikova Elena N., junior researcher of the 12th research department of the 1st directorate of research (organization of logistics) Research institute (military system research of logistics of the armed forces of the Russian Federation) Military academy of logistics named after General of the Army A.V. Khrulev (199034, Saint-Petersburg, nab. Makarova, 8), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: vf10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4577-390X>