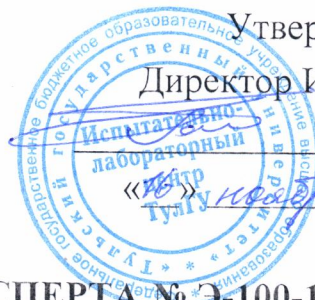


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

Тульский государственный университет
Испытательно-лабораторный центр ТулГУ
Инженерно-техническая экспертиза

г. Тула, ул. Ф. Энгельса, 157. тел./факс. 8(4872) 25-46-27; e-mail: ilc-tulgu@rambler.ru

Утверждаю
Директор ИЛЦ ТулГУ
О.Г. Гоманчук
«16» ноября 2018 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТА № Э-100-18

от 16.11.2018 г.

Основание проведения экспертизы:

Договор № Э-100-18 от 26 сентября 2018 г., заключенный между ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и Обществом с ограниченной ответственностью «Производственный комплекс «РИФ».

Распоряжением № 57 от 26.09.2018 г. по ИЛЦ ТулГУ для проведения исследования назначен эксперт:

- доцент каф. «Физика металлов и материаловедение» ТулГУ Петрушин Г.Д.
- образование – высшее, инженер-механик по спец. «Машины и технология обработки металлов давлением»;
- ученая степень, ученое звание – к.т.н., доцент;
- стаж работы по специальности 38 лет; стаж работы экспертом – 5 лет.

На разрешение эксперта вынесен вопрос:

1) Способна ли операция закатки нагретых концов стальных прямошовных труб по ГОСТ 10705 при изготовлении из них баллонов для хранения углекислоты в огнетушителях привести к нарушению равнопрочности основного металла и сварного соединения днищ баллонов?



Эксперту Испытательно-лабораторного центра ТулГУ для проведения исследования предъявлено:

Объекты:

- 1) Три баллона для хранения углекислоты в огнетушителях, изготовленных из труб стальных электросварных ГОСТ 10705-80 гр. В (диаметр 133 мм; толщина 4,5 мм). Согласно Сертификатов качества №12547, №12548 проводился вихретоковый контроль сварного соединения труб на частоте не более 3,00 кГц.
- 2) Три донышка от баллонов вышеуказанного типа для хранения углекислоты в огнетушителях.

Исследования баллона для хранения углекислоты в огнетушителях и донышек от баллонов для хранения углекислоты в огнетушителях производилось в ИЛЦ ТулГУ.

Экспертиза проведена с участием:

Организация	Должность	Ф.И.О.
ИЛЦ ФГБОУ ВО ТулГУ ФГБОУ ВО ТулГУ	Эксперт Научн. сотрудник УНИР	Петрушин Г.Д. Коротков В.А.

Термины и определения:

Деформация – изменение формы или размеров физического тела или его части под действием внешних сил.

Критические точки стали или точки Чернова – критические температуры, при которых происходит изменение фазового состояния и структуры стали при нагреве или охлаждении её в твёрдом виде.

Металлография – наука о структуре металлов и сплавов; раздел металловедения. Исследует закономерности образования структуры металла, изучает его макро- и микроструктуру, атомно-кристаллическое строение, влияние структуры на механические, электрические, магнитные и др. свойства.

Металлографический анализ – анализ структуры металлов и сплавов под микроскопом на шлифах.

ДюрOMETрический анализ – анализ твердости металлов и сплавов.



Травление – химическое или электрохимическое растворение поверхности твёрдых материалов с практической целью. Различают травление технологическое (удаление окалины, изготовление интегральных схем и печатных плат, углубление пробельных участков типографских клише, повышение гидрофильности пробельных элементов форм плоской печати и т. д.) и структурное (выявление особенностей макро- и микроструктуры кристаллических материалов, выявление дефектов в кристаллах и т. д.).

Литература:

1. ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
2. Матвеев Ю.М., Ружинский М.Б., Ромашов А.А., Халамез Е.М. Технология производства электросварных труб. – М.: Металлургия, 1967. – 164 с.
3. Металлография железа. В 3-х т. Под ред. Ф.Н. Тавадзе. Том II. Структура сталей (с атласом микрофотографий). – М.: Металлургия, 1972. – 284 с.
4. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-изд. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
5. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
6. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.
7. ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
8. ГОСТ 10705-80 Трубы стальные электросварные. Технические условия (с Изменениями N 1-8).
9. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) Металлы. Методы испытаний на растяжение (с Изменениями N 1, 2, 3).
10. Сертификат качества №12547 дата отгрузки 29.08.2018 г. АО «ВМЗ» г. Выкса.
11. Сертификат качества №12548 дата отгрузки 29.08.2018 г. АО «ВМЗ» г. Выкса.
12. Федеральный закон от 31 мая 2001г. №73-ФЗ « О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации».
13. Методические рекомендации по производству судебных экспертиз в государственных судебно-экспертных учреждениях системы Министерства юстиции Российской Федерации (утв. Приказом Министерства юстиции Российской Федерации от 20.12. 2002 г. №346).



ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

1. Объекты исследования:

- 1) Три баллона для хранения углекислоты в огнетушителях, изготовленных из труб стальных электросварных ГОСТ 10705-80 гр. В (диаметр 133 мм; толщина 4,5 мм). Согласно Сертификатов качества №12547, №12548 проводился вихретоковый контроль сварного соединения труб на частоте не более 3,00 кГц.
- 2) Три доньшка от баллонов вышеуказанного типа для хранения углекислоты в огнетушителях.

2. При проведении исследования использовалось следующее оборудование и материалы:

- штангенциркуль тип II № В167227 (свидетельство о поверке № 18474/10-4, действительно до 20 сентября 2019 г.);
- испытательная машина Р-5ПК (свидетельство о поверке № 1519/10-2-6 до 14.10.2019 г.);
- прибор для измерения микротвердости ПМТ-3 (свидетельство о поверке № 1518/10-2-6 от 15 октября 2018 г.);
- оптический микроскоп «Neophot-21»;
- оптический микроскоп Observer D1m;
- шлифовальный станок типа «Нерис – 3882»;
- Цифровая фотокамера Canon Power Shot A630.

3. Для решения поставленных вопросов исследование проводилось по следующей методике:

3.1. Органолептическим и измерительным методами устанавливались: характеристика объекта исследования (конструкция; общее техническое состояние, наличие дефектов).

3.2. Металлографическим методом выполнялся анализ структуры металла баллона.

3.3. ДюрOMETрическим методом выполнялся анализ микротвердости в различных зонах баллона, включая зону термического влияния.

3.4. Методом испытания на растяжение определялись характеристики механических свойств металла донной части баллона.



Исследование структуры и свойств сварного соединения трубных заготовок для изготовления баллонов огнетушителей

Целью исследований являлось установление влияния нагрева и технологических операций формоизменения на структуру и свойства сварного соединения днищ баллонов для хранения углекислоты в огнетушителях.

Для проведения металлографического и дюрOMETрического анализа из различных зон баллона были вырезаны образцы, в средней части которых находилось сварное соединение (внутренний грат):

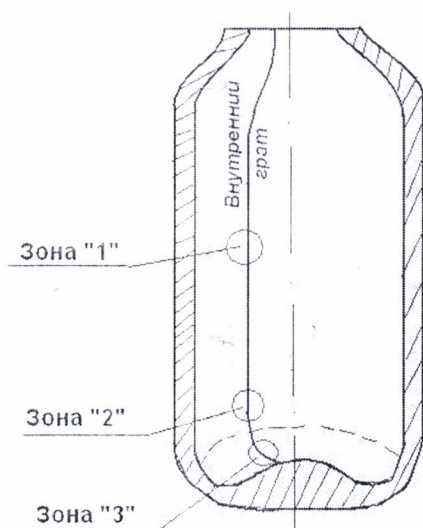


Рисунок 1. Схема вырезки образцов из баллона

-зоны «1», в которой металл имел исходную структуру трубной заготовки и не подвергался пластической деформации и температурному воздействию;

-зоны «2», которая испытывала нагрев до температуры 560 °С (значение температуры было установлено ранее экспериментально), и представляла собой переходную зону, где начиналось формирование донной части баллона;

- зоны «3», которая подвергалась высокотемпературному нагреву ТВЧ и последующей пластической деформации обжатием, и представляла собой донную часть баллона (рис.1), которая подвергалась более значительной пластической деформации по сравнению с горловинной частью (и поэтому была выбрана в качестве объекта исследования).

Образцы зон «1» и «2» представляли собой сегменты длиной 25...30 мм, которые были вырезаны из кольцевых сечений соответствующих зон баллона. Помимо образца для металлографического анализа также из зоны «3» для проведения механических испытаний на растяжение были изготовлены образцы из основного металла донной части баллона и образцы, в поперечном сечении которых находился сварной шов трубной заготовки.

Для проведения металлографического анализа и измерения микротвердости необходимо было провести ряд последовательных операций по подготовке образцов для исследований: шлифование, полирование и травление химическим реактивом.

Метод измерения микротвердости (ГОСТ 9450-76) предназначен для оценки твердости очень малых (микроскопических) объемов материалов,



например, отдельных структурных составляющих сплавов. Определением микротвердости решаются задачи по идентификации фаз в сплавах, изучении диффузионных процессов, структурообразования различных зон сварного шва и др.

Оборудование для исследований и подготовки образцов

Приготовление микрошлифов (образцов для металлографического анализа и измерения микротвердости) осуществляли по стандартной методике на шлифовальном станке типа «Нерис-3882».

После шлифования и полирования поверхности образцов проводили травление стандартным химическим реактивом, применяемым для выявления микроструктуры железоуглеродистых сплавов (3...5% раствор азотной кислоты в этиловом спирте), при комнатной температуре погружением до потускнения поверхности в течение 5...10 сек.

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе «Neophot-21» при увеличении $200\times$. Фотографирование микроструктуры осуществляли на микроскопе Observer. D1m при увеличении $50\times$, $200\times$ и $500\times$.

Для измерения микротвердости использовали прибор марки ПМТ-3. В качестве индентора при измерении микротвердости чаще всего используют правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136° . Эта пирамида плавно вдавливается в образец при нагрузках 0,05-5Н.

При измерениях микротвердости нагрузка на индентор составляла 1Н, что обеспечивало получение диагонали отпечатка размером 20...30 мкм, соизмеримой с размерами структурных составляющих в различных зонах исследуемого образца. Микротвердость измеряли методом восстановленного отпечатка делением приложенной нагрузки на условную площадь боковой поверхности отпечатка, определяемую на основе измерения двух диагоналей отпечатка по формуле [1]

$$H = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad \left[\frac{H}{\text{мм}^2} \right],$$

где P - нагрузка на индентор, Н; d - средний размер двух диагоналей, мкм.

Результаты исследований

Металлографический анализ, проведенный на образцах, вырезанных из зоны «1», которая соответствует исходной структуре трубной заготовки при изготовлении баллона, и зоны «2», примыкающей к недеформированной донной части баллона, испытывающей температурное воздействие при тем-



температуре 560 °С, показал, что и в той и в другой зоне в сварном соединении отчетливо наблюдается зона термического влияния (ЗТВ) одинаковой протяженности, которая составляет 2,0...2,3 мм (рис. 2).

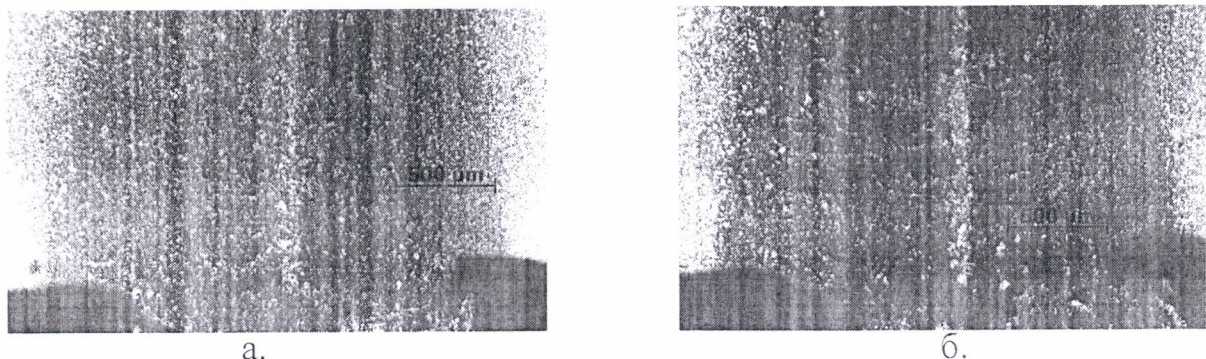


Рисунок 2. Зона термического влияния в сварном соединении в зоне «1» (а) и зоне «2» (б) баллона, 50°

Анализируя микроструктуру сварного соединения зон «1» и «2» при больших увеличениях, следует отметить, что они идентичны, поскольку разогрев трубной заготовки при технологических операциях до температуры 560 °С ниже значений критических температур ($A_{c1}=727$ °С), при которых в стали происходят фазовые и структурные изменения.

При производстве электросварных труб образование сварного соединения происходит в результате нагрева соединяемых кромок токами высокой частоты до пластичного состояния с последующим их сжатием. В местах контакта стыкуемых кромок для обеспечения наибольшей пластичности металла разогрев может достигать пред плавильных температур. В этом случае металлы в стыке кромок подвергается всестороннему неравномерному сжатию, что способствует повышению пластичности, так как при этом уменьшается межкристаллитная деформация и усиливается деформация сдвига. Сварка практически происходит в твердой фазе и образование общих зерен сварного шва осуществляется благодаря диффузионным процессам. Содержащиеся в металле газы способствуют активности протекания диффузионных процессов, что способствует получению более прочного сварного соединения[2]. После выполнения сварочной операции сварной шов интенсивно охлаждается водой.

Анализируя микроструктуру стали в средней части ЗТВ, можно отметить, что вблизи свариваемых кромок трубы, где разогрев достигал максимальных температур, и в зоне «1» и в зоне «2» наблюдается крупнозернистая игольчатая структура видманштетта (рис.3).



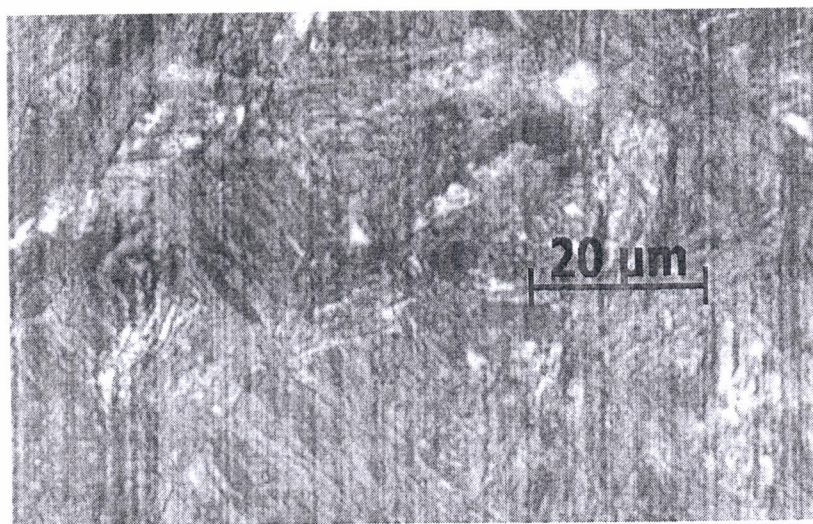


Рисунок 3. Микроструктура видманштетта в центре зоны термического влияния сварного соединения, 1000[×]

По своему фазовому составу эта структура является феррито-перлитной, в которой феррит возникает в виде пластинок внутри аустенитного зерна. Обогащенный углеродом аустенит превращается целиком или частично в перлит. При пересечении плоскостью шлифа такие пластинки кажутся иглами, между которыми располагается перлит. Такая структура характерна для низкоуглеродистой стали при ее резком охлаждении из аустенитного состояния [3].

По мере удаления от центра сварного соединения на 1,0...1,2 мм структура видманштетта сменяется зоной мелкого феррито - перлитного зерна, размером 5...10 мкм, что характерно для зоны полной перекристаллизации стали при охлаждении (рис. 4).

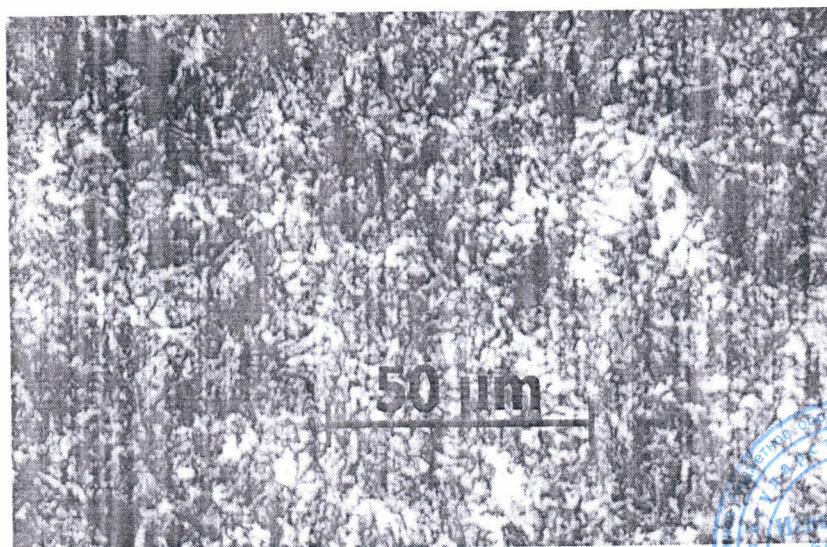


Рисунок 4. Микроструктура зоны термического влияния на расстоянии 1,0 мм от центра, 500[×]



Ввиду кратковременности нагрева интенсивного роста зерна не наблюдается. Перлит в этой зоне имеет тонкое пластинчатое строение. К зоне мелкого зерна примыкает четко выраженный участок неполной перекристаллизации (рис. 5). Перлит на этом участке выглядит разрыхленным с менее выраженным пластинчатым строением. Участком неполной перекристаллизации заканчивается зона термического влияния. Таким образом, трансформация микроструктуры стали в ЗТВ сварного соединения соответствует изменению температурного поля от нагретых кромок при индукционной сварке трубы.

Микроструктура стали вне зоны термического влияния представляет собой типичную феррито-перлитную структуру низкоуглеродистой стали марки 20, содержащей ~ 25% перлита и ~ 75 % ферритных полигональных зерен неправильной формы размером 25...40 мкм (рис.6), характерную для горячекатаной и отожженной стали.

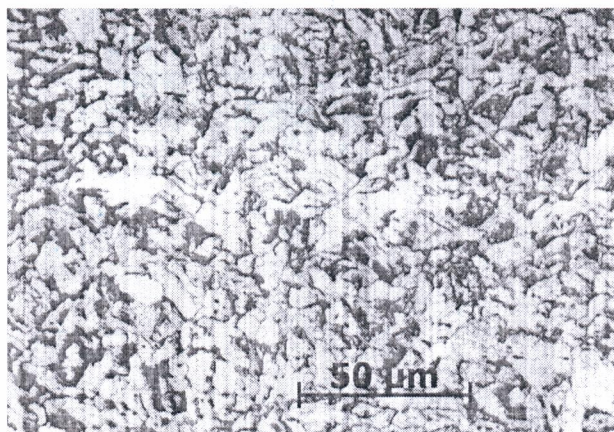


Рисунок 5. Микроструктура стали в ЗТВ на расстоянии 2 мм от центра, 500[×]

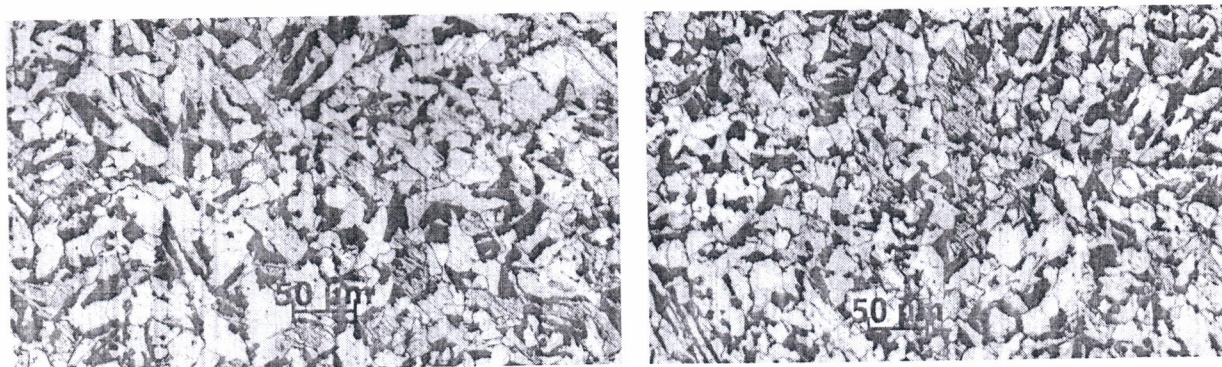


Рисунок 6. Микроструктура стали вне ЗТВ на расстоянии 10 мм от центра, 500[×]

Анализ микроструктуры донной части баллона показывает, что видимых отличий в структуре стали напротив внутреннего гратта, который определял положение сварного шва исходной трубной заготовки, и на удалении от него на расстоянии 5...7 мм не наблюдается. Это обусловлено тем, что нагрев трубной заготовки ТВЧ с высокой скоростью до температур выше 1000 °С и последующая пластическая деформация обжатием донной части баллона позволяют пройти процессам динамической рекристаллизации в течение нескольких секунд [4]. Поскольку и сварной шов и основной металл деформировались в одинаковых условиях, то и микроструктура донной части баллона в зоне «З» на уровне сварного шва (рис.7,а) идентична основному металлу (рис.7,б) и представляет собой феррито-перлитную структуру, ха-



ракторную для рекристаллизованной низкоуглеродистой стали с размером ферритного зерна 40...50 мкм.



а.

б.

Рисунок 7. Микроструктура стали донной части баллона напротив внутреннего грата в зоне «3» (а) и основного металла (б), 200[×]

Микротвердость относится к механическим характеристикам, позволяющим оценить прочность стали. Несмотря на то, что между прочностью и микротвердостью нет аналитической зависимости, ее измерение представляет интерес, так как позволяет провести исследование сварного соединения после какого-либо термического воздействия. Измерение микротвердости проводилось на различных участках микрошлифа, начиная непосредственно с центра сварного соединения, и далее на расстоянии от него на 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 5 и 7 мм. На каждом из участков выполнялось по 5 отпечатков индентора, после чего проводилась статистическая обработка полученных данных.

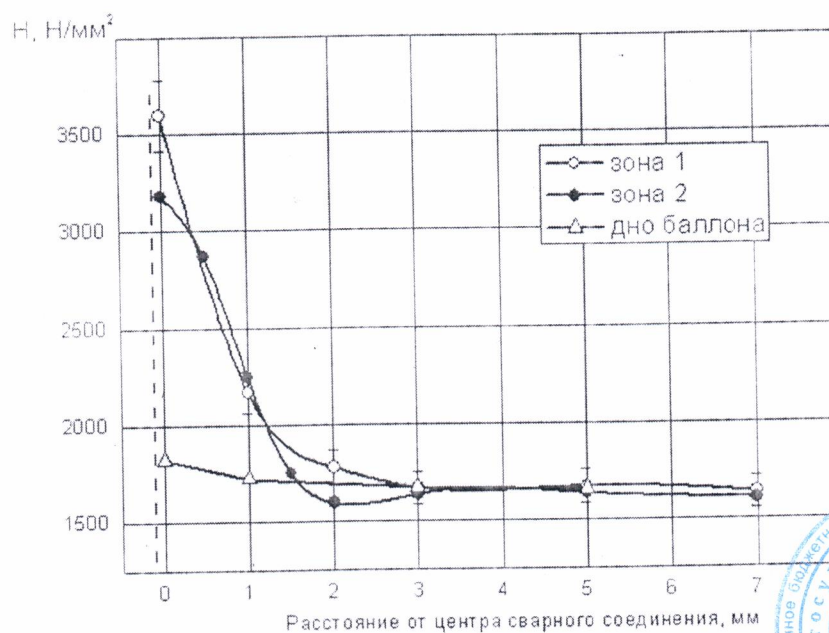


Рисунок 8. Изменение микротвердости стали в различных зонах баллона



Проведенный дюрOMETрический анализ наглядно показал (рис.8), что значения микротвердости и характер их изменения в ЗТВ в зонах «1» и «2» практически одинаков, что свидетельствует об идентичности структуры стали в сварном соединении исходной трубной заготовки и в сварном соединении зоны баллона, которая подвергалась температурному воздействию до температуры 560 °С. Высокое значение микротвердости в ЗТВ определяется объемной долей и строением перлитной составляющей структуры. В зоне «3» значения микротвердости практически одинаковы по всему сечению, что свидетельствует об однородности структуры в донной части баллона.

Принято считать, что структура стали определяет ее свойства. В доказательство этому были проведены механические испытания образцов стали, изготовленных из донной части баллона (зоны «3»), на рабочей длине которых в среднем сечении находилось сварное соединение, и образцов, изготовленных из зоны основного металла симметричной зоне «3» относительно центра донной части. Количество образцов в каждой партии составляло по 6 штук. Результаты механических испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний на растяжение образцов из донной части основного металла и вырезанных по сварному соединению

Зоны вырезки образцов для испытаний	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Образцы из основного металла	290,3	454,9	27,0
	307,2	478,8	33,5
	296,7	470,0	30,0
	292,8	424,6	27,0
	319,0	470,2	20,5
	302,6	466,0	22,5
Образцы со сварным соединением	225,6	454,6	32,5
	218	478,1	28,5
	247,1	315,0	29,0
	300,8	473,7	22,5
	342,8	475,9	30,0
	298,1	476,9	24,0

Результаты механических испытаний подлежали статистической обработке с использованием ППП STATGRAPHICS Plus for Windows с определением среднего значения и доверительного интервала. Следует обратить внимание на проверку годности первичных результатов. Если в выборке возникли



кает сомнение в том, не является ли какое-либо из значений слишком большим или слишком малым по сравнению с остальными, то это аномальное значение (промах) необходимо проверить для того, чтобы установить, не следует ли его исключить из дальнейших расчетов как результат грубого промаха[5]. Такое сомнение возникло в отношении одного аномального результата значений прочности (315 МПа), полученного на сварном соединении, которое резко отличается от других результатов измерений.

Чтобы оценить принадлежность $x_{\min}$ к некоторой нормально распределенной совокупности и принять решение об исключении или оставлении ее в составе выборки, вычисляют отношение

$$r_{\min} = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{S},$$

где $\bar{x}$ - выборочное среднее, S - выборочное среднеквадратическое отклонение.

Для данной выборки результатов $r_{\min} = \frac{446,0 - 315,0}{64,7} = 2,025$.

Полученный результат сравнивают с величиной $r_{\min}$, взятой из таблицы [6] для данного объема выборки $n = 6$ и принятого уровня значимости (0,1), которая составляет значение 1,996. Так как эмпирическое значение $r_{\min}$ больше табличного, то подозреваемый в аномальности результат может быть исключен [5]. В этом случае по оставшимся значениям вновь вычисляют выборочное среднеквадратическое отклонение и выборочное среднее, которые и будут рассматриваться как выборочные параметры изученной выборки. После проведения статистической обработки результатов среднее значение и доверительный интервал рассчитанных характеристик механических свойств представлен в таблице 2.

Таблица 2. Механические свойства основного металла донной части баллона и сварного соединения

Зоны вырезки образцов для испытаний	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Образцы из основного металла	301 ± 11	468 ± 11	$26,8 \pm 4,8$
Образцы со сварным соединением	272 ± 52	472 ± 12	$27,8 \pm 3,8$

Анализ характеристик механических свойств показывает, что временное сопротивление разрыву (предел прочности) и относительное удлинение, которое характеризует пластичность, образцов стали, изготовленных из основного металла и из зоны сварного соединения, имеют практически одинаковое значение, что подтверждается результатами металлографического анализа об идентичности микроструктуры стали в донной части баллона. Следует отметить, что согласно сертификата на поставку стальной электросварной трубы предел текучести металла сварного соединения трубной заготовки не нормирован.



Выводы эксперта

1. Проведенный металлографический и дюрометрический анализ зон сварного соединения исходной трубной заготовки для изготовления баллона и сварного соединения, которое подвергалось температурному воздействию, показал, что технологический разогрев до температуры 560°C не повлиял на микроструктуру и характер изменения микротвердости в зоне термического влияния, протяженность которой одинакова относительно исходной заготовки.

2. Результаты механических испытаний на растяжение образцов стали донной части баллона, изготовленных из основного металла, и образцов, на рабочей длине которых находилось сварное соединение, показывают одинаковые значения механических свойств, что свидетельствует о равнопрочности основного металла и сварного соединения, которое подвергалось высоко-температурному нагреву и пластической деформации обжатием при изготовлении баллона.

3. Операция закатки нагретых концов стальных прямошовных труб по ГОСТ 10705 при изготовлении из них баллонов для хранения углекислоты в огнетушителях не приводит к нарушению равнопрочности основного металла и сварного соединения днищ баллонов.



Эксперт ИИЦ ТулГУ

Г.Д. Петрушин