

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДОСТАВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

В. М. КУЛИК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены технические возможности упрощенного изготовления цельнометаллических сварных сосудов высокого давления для доставки природного газа путем использования производимых труб диаметром 351...610 мм из сталей повышенной прочности. Определены размерно-массовые параметры и напряжения в стенке сосудов в зависимости от прочности стали. Исследованы структура, структурно-механическая неоднородность и сопротивление усталости сварных соединений. Исключение из технологического процесса вальцовки, сварки, термомеханической обработки, термической обработки обечайки и формирования внешней стеклопластиковой оболочки, а также уменьшение толщины стенки, диаметра и массы обеспечивает существенное упрощение изготовления сосудов, сокращение количества проходов и продолжительности сварки кольцевых швов, расхода электроэнергии. Библиогр. 25, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* цельнометаллические сосуды высокого давления, трубы, напряжения, сварные соединения, структура, механические свойства, циклическая долговечность, размерно-массовые показатели

Одним из видов поставки природного газа является его морская транспортировка судами под давлением 20...30 МПа в цилиндрических стальных и металлопластиковых сосудах, изготавливаемых с применением газовых труб большого диаметра (1020, 1029, 1067, 1219 мм) с толщиной стенки до 40 мм из стали класса прочности X80 [1–5]. Поставку газа в Украину предлагается осуществлять в металлопластиковых сосудах диаметром 390 и 1020 мм длиной 5,8 и 11,7 м [1, 6]. Их изготовление осуществляется с применением вальцовки, сварки продольного шва, термомеханической и термической обработок обечайки из стали 30ХГСА [7] или с использованием труб из стали X80 [8] и формированием стеклопластиковой оболочки. С применением труб большого диаметра из высокопрочных низколегированных сталей предлагалось изготавливать металлопластиковые сосуды для оперативного снабжения сжатыми газами небольших предприятий, фермерских хозяйств и пр. [9].

В связи с возможной нестабильностью импортных поставок газа актуальной является доставка природного газа в передвижных сосудах упрощенного изготовления, производство которых можно быстро освоить. Изготовление цельнометаллических сосудов большого диаметра с повышенной толщиной стенки и металлопластиковых сосудов, усиленных стеклопластиковой оболочкой толщиной большей, чем толщина стенки корпуса примерно в три раза [10], достаточно сложно для современного технического состояния Украины.

Целью работы было изыскание и оценка эффективности упрощенного изготовления сосу-

дов высокого давления для доставки и хранения природного газа с перспективой возможности быстрого освоения их производства. Она решается исключением из технологического процесса формирования стеклопластиковой оболочки и изготовления термообрабатываемой обечайки за счет применения производимых труб среднего диаметра, в том числе термообработанных, с толщиной стенки не большей, чем толщина стенки (9,1 и 13,5 мм) корпусов металлопластиковых сосудов большого диаметра (1020 мм).

Цельнометаллический сосуд состоит из равнотолщинных обечайки из трубы среднего диаметра из стали повышенной прочности и двух выпуклых днищ с патрубком и штуцером, по крайней мере, в одном, сваренных встык кольцевыми швами. Производимые в Украине с применением дуговой сварки трубы диаметром 426 мм и более могут изготавливаться из листовых сталей класса прочности X80 и X100. Такие стали, легированные 1,6...1,9 % Mn и микролегированные Ni, Cr, Mo, Ti, V, Nb, после термомеханической обработки, в том числе контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения, а также других видов обработки, отличаются повышенными прочностью ( $\sigma_B \geq 625$  и 760 МПа), пластичностью ( $\delta_5 \geq 18$  и 17 %) и вязкостью ( $KC_{-40} \geq 155$  и 160 Дж). Снижение содержания углерода до 0,03 % и серы до 0,01 % обеспечивает повышение пластичности, деформируемости и вязкости, улучшение свариваемости по сравнению с углеродистой легированной сталью [11–13].

Бесшовные горячедеформированные трубы диаметром 530 (550) мм и менее изготавливаются из стали 30ХГСА с  $\sigma_B \geq 686$  МПа и  $\delta_5 \geq 11$  %. По тре-

бованию потребителя они должны изготавливаться термически обработанными. Такие трубы приведены в перечне материалов, используемых для изготовления сосудов, работающих под давлением [14].

Основные технические параметры рассматриваемых цельнометаллических сосудов длиной 11,4...11,6 м, предлагаемых для доставки природного газа (как возможный вариант), приведены в таблице. Они определены с применением формул (1)-(5), из которых формулы (2) и (3) представлены в работе [15], формула (1) выведена из формулы (2).

$$S = \frac{K_3 P D}{2(\sigma_B + K_3 P)}, \quad (1)$$

$$\sigma_p^k = \frac{P(D - 2S)}{2S}, \quad (2)$$

$$\sigma_p^m = \frac{P(D - 2S)}{4S(D - S)}, \quad (3)$$

$$V = 0,262(D - 2S)^2(3l_{ц} + 2D), \quad (4)$$

$$M = 24,65S(D - S)(l_{ц} + D), \quad (5)$$

где  $S$ ,  $D$  и  $l_{ц}$  — толщина стенки, наружный диаметр и длина цилиндрической части сосуда;  $K_3$  — коэффициент запаса прочности сосуда;  $P$  — рабочее давление газа в сосуде (20 МПа);  $\sigma_p^k$ ,  $\sigma_p^m$  и  $[\sigma]$  — рабочие кольцевые, меридиальные и допускаемые напряжения в стенке;  $V$  и  $M$  — вместимость и масса сосуда.

Согласно Правил DNV для грузовых емкостей судов CNG допускается  $K_3 = 1,60...1,80$  [3]. Такой же  $K_3$  может быть для магистральных трубопроводов, а при толщине стенки 18,7 мм с поверхностным дефектом длиной 500 мм и глубиной до 5,3 мм он составляет 1,77...1,80 [16]. Металлопластиковые сосуды допускается изготавливать с  $K_3 =$

$= 1,70$  и  $1,75$  [1, 17]. Поэтому соблюдение запаса прочности примерно 1,75 цельнометаллических сварных сосудов вполне оправдано.

Минимальный диаметр приведенных в таблице сосудов из сталей X80 и X100 обусловлен минимальным диаметром 426 мм производимых в Украине с применением дуговой сварки труб. Минимальным диаметрам 508 и 351 мм сосудов из стали 30ХГСА соответствует расчетная толщина стенки 9,0 и 8,5 мм, меньше которой бесшовные горячедеформированные трубы (термообработанные и нетермообработанные) приведенных диаметров не производятся. В сосудах диаметрами большими, чем приведено в таблице, толщина стенки превышает толщину стенки корпуса из таких же сталей металлопластиковых сосудов.

При использовании труб из стали X80 толщина стенки сосуда с запасом прочности 1,75 может быть 11,1 и 13,2 мм. Сосуды из сталей 30ХГСА термообработанной и нетермообработанной и X100 могут иметь толщину стенки 9,0...9,4; 8,5...12,7 и 9,0...12,8 мм, соответственно, с соблюдением запаса прочности 1,75...1,78. При этом, сосуды из двух последних сталей изготавливаются в более широких пределах диаметров 351...530 и 426...610 мм. Отношение  $D/S$  сосуда линейно возрастает с увеличением  $\sigma_B$  стали, сопровождаемым снижением отношения  $M/V$  от 0,89 до 0,60 т/м<sup>3</sup> (рис. 1). Такое же снижение  $M/V$  происходит почти линейно с увеличением  $D/S$ . При этом сосуды из стали одного уровня прочности имеют одинаковые значения  $D/S$ ,  $\sigma_p^k$ ,  $\sigma_p^m$  и  $M/V$ .

Рабочие кольцевые напряжения  $\sigma_p^k$  не превышают допускаемые напряжения  $[\sigma] = \sigma_B/K_3$ , а меридиальные напряжения  $\sigma_p^m$  уступают  $[\sigma]$  в 2,04...2,06 раза. Это исключает разрушение сосуда при постоянном давлении газа 20 МПа. Напряжения в стенке полусферических днищ являются такими же, как меридиальные напряжения [15].

**Размерно-массовые параметры и напряжения в стенке стальных сосудов длиной 11,4...11,6 м при  $P_p = 20$  МПа**

Параметры	Сталь трубы и сосуда											
	X80 $\sigma_B = 640$ МПа		30ХГСА с т/о $\sigma_B = 960$ МПа		30ХГСА без т/о $\sigma_B = 700$ МПа				X100 $\sigma_B = 800$ МПа			
$D$ , мм	508	426	530	508	530	426	377	351	610	558	508	426
$S$ , мм	13,2	11,1	9,4	9,0	12,7	10,2	9,0	(8,5)	12,8	11,7	10,7	9,0
$D/S$	38,5	38,4	56,4	56,4	41,7	41,8	41,9	41,3	47,6	47,7	47,5	47,3
$K$	1,75	1,75	1,76	1,76	1,76	1,76	1,75	1,78	1,75	1,75	1,76	1,76
$[\sigma]$ , МПа	365,7	365,7	545,5	545,5	397,7	397,7	400,0	392,9	457,1	457,1	454,5	454,5
$\sigma_p^k$ , МПа	364,8	363,8	543,8	544,4	397,3	397,6	398,9	392,0	456,6	456,9	454,7	453,2
$\sigma_p^m$ , МПа	177,5	177,1	267,0	267,3	193,8	193,9	194,6	191,6	223,4	223,6	222,5	221,7
$V$ , м <sup>3</sup>	2,06	1,44	2,33	2,14	2,27	1,45	1,14	0,985	3,06	2,55	2,11	1,47
$M$ , т	1,85	1,29	1,40	1,28	1,86	1,19	0,93	0,814	2,19	1,82	1,50	1,05
$M/V$ , т/м <sup>3</sup>	0,89	0,89	0,60	0,60	0,81	0,82	0,81	0,826	0,71	0,71	0,71	0,71

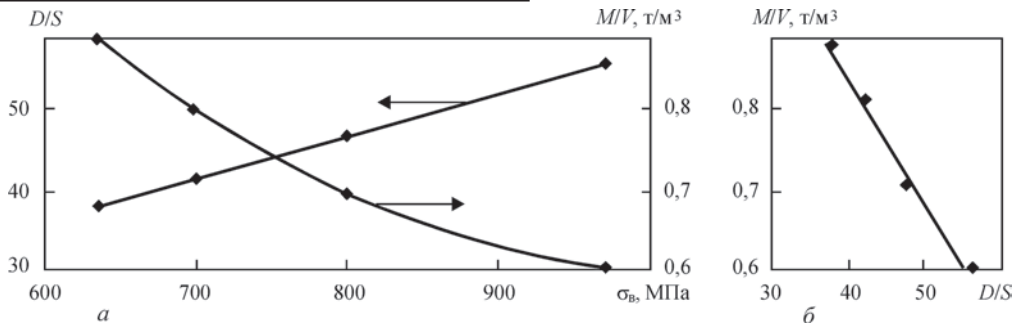


Рис. 1. Влияние  $\sigma_B$  стали трубы на D/S и M/V (а) и D/S на M/V (б) цельнометаллических сосудов диаметром 351...610 мм

Поэтому днища могут быть сформированы из менее дорогих нелегированных и низколегированных сталей широкого потребления, используемых для изготовления сосудов, работающих под давлением. Их  $\sigma_B$  должен быть не ниже  $0,5\sigma_B$  стали применяемых труб.

Масса цельнометаллических сосудов в пределах 0,81...1,85 т является значительно меньшей, чем  $M = 4,95$  и  $6,15$  т металлопластиковых сосудов такой же длины. Это в сочетании с меньшими толщиной стенки и диаметром облегчает проведение сварочных и такелажных работ. Их вместимость 0,99...3,06 м³ значительно уступает вместимости металлопластиковых сосудов большого диаметра. Масса и вместимость изменяются синхронно с изменением диаметра и длины. При размещении цельнометаллических сосудов в контейнере их суммарная вместимость может превышать суммарную вместимость металлопластиковых сосудов благодаря отсутствию стеклопластиковой оболочки. Объем газа в контейнере почти не зависит от диаметра размещаемых в нем сосудов.

Показатель M/V практически не зависит от диаметра и длины сосуда при соблюдении  $l_{ц}/D = 5...7$  и более.

$M/V = \rho \left[ 2 \frac{K_3 p}{\sigma_B} + \left( \frac{K_3 p}{\sigma_B} \right)^2 \right]$  определяется прочностью стали, запасом прочности сосуда и давлением газа ( $\rho = 7,85$  т/м³ — плотность стали). Практическая независимость M/V от размерных параметров сосуда дает возможность быстро оценить этот показатель до разработки его конструкции.

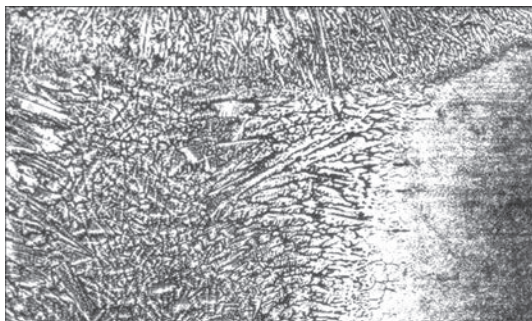


Рис. 2. Первичная микроструктура металла ( $\times 50$ ) корневого и следующего слоев шва стыкового соединения

Односторонняя многопроходная дуговая сварка поворотных стыков труб и днищ с толщиной стенки 9,0...13,2 мм с U-образной разделкой кромок с учетом [9, 18–20] осуществляется при выполнении корневого слоя навесу плавящимся электродом в среде защитного газа, в частности, в  $CO_2$ , неплавящимся электродом в среде аргона и покрытыми электродами. Небольшой вес сварочной ванны при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом с активирующим флюсом и кристаллизация металла от боковых стенок (рис. 2) способствуют предотвращению протекания расплавленного металла и улучшению формирования сварного соединения с обратной стороны. Последующее заполнение разделки кромок можно продолжать приведенными способами сварки. Кольцевые соединения подвергаются местному отпуску, в частности гибкими электронагревателями.

Многослойный металл шва опытных стыков стали X80, сваренной под флюсом, имеет, подоб-

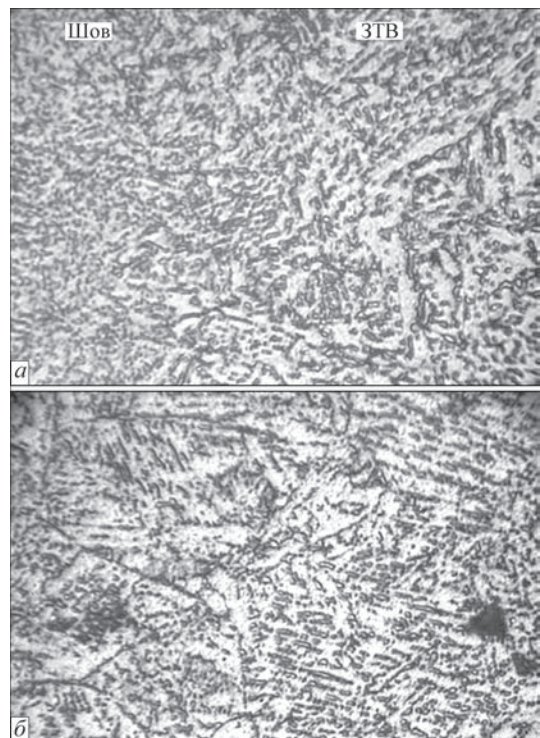


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 320$ ) металла зоны сплавления (а) и ЗТВ (б) стали класса прочности X80

но металлу продольного шва производимых труб [21], ферритно-бейнитную структуру с включениями МАК-фазы (рис. 3). Его повышенная твердость  $HRB\ 88...91$  по сравнению с  $HRB\ 72...75$  и  $71...72$  основного металла и ЗТВ практически сохраняется после высокого отпуска ( $HRB\ 88...89$ ,  $71...73$  и  $70...73$ ).

Микроструктура металла сварного соединения стали 30ХГСА представляет собой смесь мартенсита, бейнита, а также феррита (рис. 4) [22]. В местах повторных кратковременных нагревов ниже начала аустенитного превращения  $A_c$  имеется тенденция к появлению структуры сорбита отпуска. В верхней части соединения, выполненного аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, металл шва и прилегающих к нему участков ЗТВ имеет высокую твердость  $HV_{0,2} = 390...500$ , которая снижается до  $HV_{0,2} = 230$  при удалении от шва в сторону термоулучшенного основного металла твердостью  $HV_{0,2} = 280...300$  (рис. 5, а). Металл нижней части шва имеет меньшую твер-

дость  $HV_{0,2} = 260...300$  за счет отпусков при сварочных нагревах. Более длительный послесварочный местный отпуск вызывает снижение твердости металла верхней и нижней частей шва до  $HV_{0,2} = 330...420$  и  $HV_{0,2} = 230...240$  (рис. 5, б). У высокоотпущенного соединения, выполненного проволокой Нп-30ХГСА в среде  $CO_2$ , достигается равномерное по ширине и высоте распределение твердости  $HV_{0,2} = 270...330$ .

Ударная вязкость  $KCU_{20}$  металла шва типа 10Х2М и ЗТВ опытных стыков стали Х80 при выполнении высокого отпуска незначительно возрастает от 86 до 87...95 и от 286 до 289...305 Дж/см<sup>2</sup>. Микролегированный марганцовистый металл шва труб для магистральных трубопроводов имеет более высокую  $KCV_{20} = 110...120$  Дж/см<sup>2</sup> [21]. Высокоотпущенный металл шва типа 18ХМ стали 30ХГСА —  $KCU_{20} = 90,9$  Дж/см<sup>2</sup>. Приведенные значения ударной вязкости сварных соединений превышают минимально допустимые  $KCU_{20} = 50$  Дж/см<sup>2</sup> и  $KCV_{20} = 35$  Дж/см<sup>2</sup> [14].

Более высокая прочность металла шва обуславливает разрушение статически испытываемых сварных образцов за его пределами. Металл повышенной прочности отличается повышенным сопротивлением усталости. Циклическая долговечность при растяжении до  $\sigma_H = 350$  МПа плоских сварных образцов из стали Х80 выпрямленной части трубы большого диаметра после сварки под флюсом встык выдерживают 86100 циклов до разрушения от места перехода шва с высотой усиления примерно 1,5 мм к основному металлу. Она возрастает до 114100 циклов после высокого от-

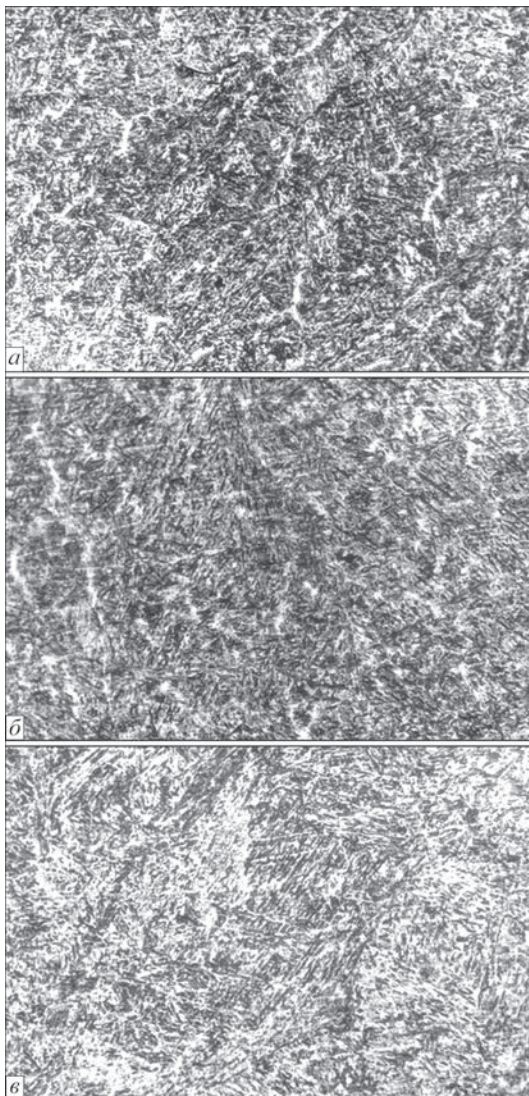


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 320$ ) металла корневого (а) и следующего (б) слоев шва и зоны сплавления (в) стали 30ХГСА

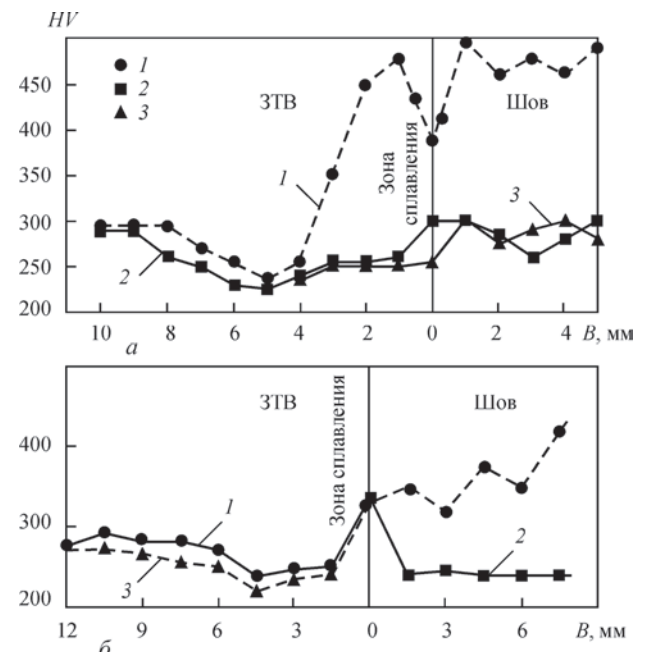


Рис. 5. Распределение микротвердости в верхней (1), нижней (2) и срединной (3) частях стыкового соединения термоулучшенной стали 30ХГСА толщиной 10 мм после аргонодуговой сварки (а) и последующего местного отпуска (б)

пуска, а при сочетании высокого отпуска с меньшей нагрузкой  $\sigma_n = 300$  МПа увеличивается до 312400 циклов. Установленное количество циклов одноосного растяжения до разрушения образцов из стали X80, сваренной под флюсом, превышает 5200...7800 циклов заполнений и выпусков газа 2...3 раза в неделю в течение 50 лет эксплуатации в 11...22 раза и более. Оно значительно больше 15000...24000 циклов гидравлически испытываемых комбинированных автомобильных баллонов с термоупрочненным и усиленным стеклопластиком корпусом из легированной стали [23].

С уменьшением высоты усиления шва до 0,3...0,5 мм и улучшением формирования сварного соединения при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом стали 30ХГСА циклическая долговечность образцов в состояниях после сварки и местного отпуска превышает 217800 и 229200 циклов нагрузки при  $\sigma_n = 350$  МПа (разрушения по галтели). После снижения шероховатости галтелей сварные образцы не разрушаются в течение 584400 и 674400 циклов при такой же нагрузке, превышающей  $\sigma_p^M = 192...194$  и 267 МПа, равного  $0,273...0,278\sigma_v$  стали нетермообработанной и термообработанной бесшовных труб. Пределы усталости  $\sigma_{-1}$  около  $0,4\sigma_v$  стали [24] и  $\sigma_0 = 0,27...0,30\sigma_v$  сварных соединений низколегированных высокопрочных сталей [25] превышают  $\sigma_p^M$ , и опасность усталостного разрушения кольцевых соединений от изменяющегося давления газа в цельнометаллическом сосуде отсутствует.

### Выводы

1. Обоснована целесообразность упрощенного изготовления сварных сосудов высокого давления для доставки природного газа и газоснабжения небольших предприятий. Это достигается применением производимых труб среднего диаметра из сталей повышенной прочности (X80, 30ХГСА, X100) и исключением из технологического процесса операций с высокой энергозатратностью по формированию внешней стеклопластиковой оболочки и изготовлению сварной термоупрочненной обечайки. Для изготовления днищ цельнометаллических сосудов приемлемы менее прочные листовые низколегированные (и углеродистые качественные) конструкционные стали.

2. Относительно небольшие толщина стенки, диаметр и масса сосудов обуславливают упрощение проведения сварочных и такелажных работ, сокращение количества проходов и продолжительности сварки, расхода сварочных материалов и электроэнергии. Выполняемые кольцевые соединения цельнометаллических сосудов не разрушаются при постоянном и изменяющемся давлении газа.

3. Оношение  $M/V$  цельнометаллических сосудов слабо зависит от размеров сосуда. Этот показатель оперативно оценивается по прочности стали трубы без определения  $M$  и  $V$ .

4. Свободный доступ к цилиндрической поверхности сосуда способствует упрощению технического обслуживания и проведению ремонтно-восстановительных работ. Для изготовления цельнометаллических сосудов с применением труб среднего диаметра требуется простое сварочное оборудование. Его организация не вызывает особых трудностей.

*Автор признателен В. П. Елагину и А. З. Кузьменко за помощь в исследовании распределения твердости и малоциклового усталости сварных образцов.*

### Список литературы

1. Патон Б. Е., Савицкий М. М., Савицкий А. М., Мазур А. А. (2014) Эффективность морской транспортировки природного газа при использовании сварных баллонов высокого давления. *Автоматическая сварка*, **8**, 49–55.
2. Блинков А. Н., Власов А. А. (2006) Морская транспортировка сжатого газа. Новые возможности для освоения месторождений природного газа на шельфе. *Морская биржа*, **2**, 65–69.
3. Блинков А. Н., Власов А. А., Лацис А. В., Шурняк В. К. (2007) Новая технология морской транспортировки газа: состояние, проблемы, перспективы. *Сб. Регистра Судостроения*. С.-Петербург, **30**, 127–162.
4. Рен Ч. Г., Зеленская Е. В. (2011) Обзор существующих методов транспортировки природного газа на дальние расстояния и оценка их применимости. *Нефть, газ и бизнес*, **3**, 3–9.
5. Зайцев Вал., В., Зайцев В. В., Котова Е. В., Скрипниченко К. С. (2010) Анализ особенностей требований классификационных обществ к судам, перевозящим сжатый природный газ. *Зб. наук. праць НУК*. Миколаїв, НУК, **5**(434), 11–18.
6. Савицкий М. М., Савицкий А. М., Супруненко В. А. и др. (2013) Определение параметров облегченных сварных баллонов для грузовой системы CNG-газовозов. *Электронный вестник НУК*, **1**, 4–11.
7. Савицкий М. М., Кулик В. М., Лупан А. П. та ін. (2008) *Спосіб виготовлення композитного балона*. Україна, Пат. 83095.
8. Кулик В. М., Савицкий М. М., Елагин В. П., Демченко Е. Л. (2012) *Спосіб виготовлення композитної посудини*. Україна, Пат. 100273.
9. Кулик В. М., Савицкий М. М., Елагин В. П., Демченко Э. Л. (2011) Возможности применения высокопрочных низколегированных трубных сталей для изготовления сосудов высокого давления. *Автоматическая сварка*, **2**, 49–54.
10. Кулик В. М., Савицкий М. М., Супруненко В. О. (2016) *Балон комбінований*. Україна, Пат. 11268.
11. Тухбатуллин Ф. Б., Галиуллин З. Т., Карпов С. В. и др. (2001) Низколегированные стали для магистральных газопроводов и их сопротивление разрушению. *Обз. информ. Сер. Транспорт и надземное хранение газов*. Москва, ИРЦ Газпром.
12. Бауер Д., Флюс П., Аморис Е. и др. (2006) Микроструктура и характеристики трубных сталей после термомеханической обработки. *Новости черн. металлургии за рубежом*, **4**, 65–76.
13. Набуки И., Шигери Е., Джос К. (2006) Трубы УОЕ с высокими характеристиками для магистральных трубопроводов. *Там же*, **77–80**.

14. (1998) *Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском*. Київ.
15. Писаренко Г. С., Агарев В. А., Квитка А. Л. и др. (1967) *Сопроотивление материалов*. Писаренко Г. С. (ред.). Киев, ГИТЛ УССР.
16. СТО Газпром 2-2.3-184-2007. (2008) *Методика по расчету и обоснованию коэффициентов запаса прочности и устойчивости магистральных газопроводов на стадии эксплуатации и технического обслуживания*. Москва.
17. Патон Б. Е., Савицкий М. М., Савиченко А. А., Супруненко В. А. (2009) *Сосуды высокого давления для природного газа. Проблемы сварки, родственных процессов и технологий*. Николаев, сс. 89–90.
18. Каховский Н. И., Фартушный В. Г., Ющенко К. А. (1975) *Электродуговая сварка сталей*. Справочник. Киев, Наукова думка.
19. Кулик В. М., Савицкий М. М., Лупан А. П., Черторильский Л. О. (2007) *Способ дугового багатопрохідного зварювання неплавким електродом*. Україна, Пат. 81053.
20. Кулик В. М., Савицкий М. М., Лупан А. Ф. и др. (2007) *Аргондоговая сварка заготовок валов для металлургического оборудования. Автоматическая сварка*, **10**, 34–39.
21. Рыбаков А. А., Филипчук Т. Н., Костин В. А. (2015) Особенности микроструктуры и ударная вязкость металла сварных соединений труб из высокопрочной стали с ниобием и молибденом. *Там же*, **3-4**, 17–24.
22. Кулик В. М., Васильев В. Г., Григоренко Г. М. и др. (2007) Фазовые и структурные превращения при сварке и дуговой обработке соединений стали 30ХГСА. *Там же*, **9**, 10–15.
23. Савицкий М. М., Савиченко А. А., Кулик В. М. и др. (2007) *Облегченные сварные баллоны для автотранспорта*, *Там же*, **1**, 52–53.
24. Серенсен С. В., Шнейдерович Р. М., Гусенков А. П. и др. (1975) *Прочность при малоцикловом нагружении*. Москва, Наука.
25. Труфяков В. И. (1973) *Усталость сварных соединений*. Киев, Наукова думка.
7. Savitsky, M.M., Kulyk, V.M., Lupan, A.P. et al. (2008) *Method of manufacture of composite cylinder*. Pat. 83095 Ukraine [in Ukrainian].
8. Kulyk, V.M., Savitsky, M.M., Elagin, V.P., Demchenko, E.L. (2012) *Method of manufacture of composite vessel*. Pat. 100273 Ukraine [in Ukrainian].
9. Kulik, V.M., Savitsky, M.M., Elagin, V.P., Demchenko, E.L. (2011) Capabilities of application of high-strength low-alloy pipe steels for manufacture of high-pressure vessels. *The Paton Welding J.*, **2**, 43–47.
10. Kulyk, V.M., Savitsky, M.M., Suprunenko, V.O. (2016) *Combined cylinder*. Pat. 11268 Ukraine [in Ukrainian].
11. Tukhbatullin, F.B., Galiullin, Z.T., Karpov, S.V. et al. (2001) Low-alloy steels for main gas pipelines and their resistance to fracture. *Inform. Rev. Ser. Transport and overhead storage of gases*. Moscow, IRTs Gazprom [in Russian].
12. Bayer, D., Flus, P., Amoris, E. et al. (2006) Microstructure and characteristics of pipe steels after thermal and mechanical treatment. *Novosti Chyorn. Metallurgii za Rubezhom*, **4**, 65–76 [in Russian].
13. Nabuki, I., Shigeri, E., Jos, K. (2006) Pipes UOE with high characteristics for main pipelines. *Ibid.*, **77-80** [in Russian].
14. (1998) *Regulations of design and safe operation of pressure vessels*. Kiev [in Ukrainian].
15. Pisarenko, G.S., Agarev, V.A., Kvitka, A.L. et al. (1967) *Strength of materials*. Ed. by G.S. Pisarenko. Kiev, GITL Ukr. SSR [in Russian].
16. (2008) SТО Gazprom 2-2.3-184-2007: *Procedure on calculation and substantiation of safety and stability factors of main gas pipelines at the stage of service and maintenance*. Moscow [in Russian].
17. Paton, B.E., Savitsky, M.M., Savichenko, A.A., Suprunenko, V.A. (2009) High-pressure vessels for natural gas. In: *Problems of welding, related processes and technologies*. Nikolaev, 89-90 [in Russian].
18. Kakhovsky, N.I., Fartushny, V.G., Yushchenko, K.A. (1975) *Electric arc welding of steels: Refer. book*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
19. Kulyk, V.M., Savitsky, M.M., Lupan, A.P., Chertorylsky, L.O. (2007) *Method of multipass nonconsumable electrode welding*. Pat. 81953 Ukraine [in Ukrainian].
20. Kulik, V.M., Savitsky, M.M., Lupan, A.F. et al. (2007) Argon-arc welding of billets of shafts for metallurgical equipment. *The Paton Welding J.*, **10**, 28-32.
21. Rybakov, A.A., Filipchuk, T.N., Kostin, V.A. (2015) Peculiarities of microstructure and impact toughness of metal of welded joints of pipes of high-strength steel with niobium and molybdenum. *Ibid.*, **3-4**, 16-23.
22. Kulik, V.M., Vasiliev, V.G., Grigorenko, G.M. et al. (2007) Phase and structural transformations in welding and arc treatment of 30KhGSA steel joints. *Ibid.*, **9**, 6-10.
23. Savitsky, M.M., Savichenko, A.A., Kulik, V.M. et al. (2007) Light-weight welded cylinders for motor transport. *Ibid.*, **1**, 43.
24. Serensen, S.V., Shnejderovich, R.M., Gusenkov, A.P. et al. (1975) *Strength under low-cycle loading*. Moscow, Nauka [in Russian].
25. Trufyakov, V.I. (1973) *Fatigue of welded joints*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

## References

## ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ ПОСУДИН ВИСОКОГО ТИСКУ ДЛЯ ДОСТАВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

В. М. КУЛИК

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто технічні можливості спрощеного виготовлення суцільнометалевих зварних посудин високого тиску для доставки природного газу шляхом використання вироблених труб діаметром 351 ... 610 мм зі сталей підвищеної міцності. Визначено розмірно-масові параметри і напруження в стінці посудин в залежності від міцності сталі. Досліджено

структуру, структурно-механічну неоднорідність і опір втомі зварних з'єднань. Виключення з технологічного процесу вальцювання, зварювання, термомеханічної обробки, термічної обробки обичайки і формування зовнішньої склопластикової оболонки, а також зменшення товщини стінки, діаметра і маси забезпечує суттєве спрощення виготовлення посудин, скорочення кількості проходів і тривалості зварювання кільцевих швів, витрати електроенергії. Бібліогр. 25, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова: суцільнометалеві посудини високого тиску, труби, напруження, зварні з'єднання, структура, механічні властивості, циклічна довговічність, розмірно-масові показники*

## TECHNICAL PARAMETERS AND FEATURES OF MANUFACTURING HIGH-PRESSURE VESSELS FOR NATURAL GAS TRANSPORTATION

V.M. KULIK

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail:office@paton.kiev.ua

Considered are technical capabilities of simplified manufacture of all-metal welded high-pressure vessels for transportation of natural gas by means of application of produced 351-610 mm diameter pipes from increased strength steels. Dimension-weight parameters and stresses in vessel wall depending on steel strength are determined. The structure, structure-mechanical inhomogeneity and fatigue resistance of the welded joints were examined. Elimination of rolling, welding, thermal-mechanical treatment, thermal treatment of shell from the technological process and formation of outer fiberglass casing as well as reduction of wall thickness, diameter and weight provides significant simplification of vessel manufacture, reduction of amount of passes and duration of welding of circumferential welds, power consumption. 25 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

*Keywords: all-metal high-pressure vessels, pipes, stresses, welded joints, structure, mechanical properties, cyclic strength, dimension-weight indices*

Поступила в редакцию 08.02.2018

### Вниманию читателей!

Вышел в свет второй выпуск информационного бюллетеня ассоциации «Электрод» «Электрод Информ» за II кв. 2018 г.

В номере:

Календарь мая  
Поздравляем! (именинники апреля, мая, июня)  
Лауреаты премии им. академика НАН Украины  
И. К. Походни  
Рассказы о славных свершениях  
Сравнение аустенитных сварочных электродов с основным и титанистым типами покрытий  
Отечественные электроды с рутиловым и пластмассовым покрытиями для дуговой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей  
Международная выставка «Сварка/Welding 2018»  
Всероссийская научная конференция  
VIII специализированная выставка «Металл. Оборудование. Инструмент»  
Новые члены ассоциации «Электрод»  
Календарь выставок и конференций (II полугодие 2018 г.)  
Памяти Павла Васильевича Игнатченко  
Члены ассоциации «Электрод»



Информационная поддержка — журнал «Автоматическая сварка».

[www.assotitacion-electrode.com](http://www.assotitacion-electrode.com)