

DOI 10.15589/jnn20150411
 УДК 622.691
 3-17

**PROSPECTIVE MATERIALS, METHODS AND TECHNOLOGIES
 OF LIGHTWEIGHT STEEL BALLOONS WELDING FOR COMPRESSED
 NATURAL GAS CARRIERS**

**ПЕРСПЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ, СПОСОБИ І ТЕХНОЛОГІЇ
 СВАРКИ ОБЛЕГЧЕНИХ СТАЛЬНИХ БАЛЛОНІВ ДЛЯ CNG-ГАЗОВОЗІВ**

Volodymyr V. Zaytsev
 zvv1949@gmail.com
 ORCID:0000-0002-3637-9273

M. M. Savitsky
 sam@paton.kiev.ua
 ORCID: —

A. M. Savitsky
 e-mail: —
 ORCID —

Valeriy V. Zaytsev
 zvalv1974@gmail.com
 ORCID: 0000-0002-8590-5671

Dmytro V. Zaytsev
 zdmlv1982@gmail.com
 ORCID 0000-0001-5778-4668

В. В. Зайцев
 д-р техн. наук, проф.¹

М. М. Савицкий
 д-р техн. наук, ст. науч. сотр.²

А. М. Савицкий
 канд. техн. наук²

В. В. Зайцев
 д-р техн. наук, доц.¹

Д. В. Зайцев
 канд. техн. наук¹

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

²*The E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

¹*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев*

²*Институт электросварки НАН Украины, г. Киев*

Abstract. Prospective materials, methods and technologies of lightweight steel balloons welding which can be used in the cargo system of CNG-carriers have been considered. The issues of the manufacturing technology for these balloons are considered. The equipment for welding of lightweight steel CNG-balloons, which was developed by the authors, is described.

Keywords: CNG-carrier; lightweight steel balloon; welded joint; welding methods; welding technology; materials; orbital coiling.

Аннотация. Рассмотрены перспективные материалы, способы и технологии сварки облегченных стальных баллонов, которые могут быть применены в грузовой системе CNG-газовозов. Рассмотрены вопросы технологии изготовления этих баллонов. Описано созданное авторами оборудование для сварки облегченных стальных CNG-баллонов для CNG-газовозов.

Ключевые слова: CNG-газовоз; облегченный стальной баллон; сварное соединение; способы сварки; технологии сварки; материалы; орбитальная намотка.

Анотація. Розглянуто перспективні матеріали, способи та технології зварювання полегшених сталевих балонів, які можуть бути застосовані у вантажній системі CNG-газовозів. Розглянуті питання технології виготовлення цих балонів. Описано створене авторами обладнання для зварювання полегшених сталевих CNG-балонів.

Ключові слова: CNG-газовоз; полегшений сталевий балон; зварне з'єднання; засоби зварювання; технології зварювання; матеріали; орбітальне намотування.

REFERENCES

- [1] Kryzhanivskiy Ye. I., Zaitsev Val. V. *Kontseptsia alternatyvnoho postachannia pryrodnoho hazu do Ukrainy* [Concept of alternative natural gas supply to Ukraine]. *Vseukrainskyi shchokvartalnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch» — All-Ukrainian quarterly scientific and technical journal "Prospecting and Development of oil and gas fields"*. Ivano-Frankivsk, IFNTUNH Publ., 2010, no. 4 (37), pp. 5–13.

- [2] Zaytsev Val. V., Zaytsev V. V., Kotova Ye. V., Skripnichenko K. S. *Analiz osobennostey trebovaniy klassifikatsionnykh obshchestv k sudam, perevozyashchim szhatyy prirodnyy gaz* [Analysis of the specific features of the classification societies requirements for CNG carriers]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*. 2010, no. 5 (434), pp. 11–18.
- [3] Vagner F. A. *Termotsiklirovanie pri svarke volframovym elektrodom* [Temperature cycling at welding with a tungsten electrode]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding production*. 1980, no. 2, pp. 4–6.
- [4] Dudko D. A., Savitskiy A. M., Savitskiy M. M., Oleynik Ye. M. *Osobennosti teplovykh protsessov pri svarke s termotsiklirovaniem* [Specifics of thermal processes at welding with thermal cycling]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*. 1998, no. 4, pp. 8–12.
- [5] Savitskiy A. M., Vasilev V. G., Savitskiy M. M., Vashchenko V. N. *Vliyanie stadii nagreva na formirovanie struktury svarnykh soedineniy zakalivayushchikhsya staley* [Influence of the heating phase on the formation of the structure of welded joints of hardenable steels]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*. 2005, no. 1, pp. 19–21.
- [6] Savytskyi O. M. *Vplyv shvydkisnykh nahriviv na strukturu vuhletsevykh stalei pry lokalnii termichnii dii* [Influence of speed heatings on the structure of carbon steels at local thermal action]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv — Metal Science & Treatment of Metals*. 2005, no. 4, pp. 33–35.
- [7] Savytskyi O. M. *Keruvannia strukturovutvorenniam u vuhletsevykh staliakh pry lokalnomu termichnomu vplyvovi* [Control of the structure formation in carbon steels at local thermal action]. *Metaloznavstvo ta obrobka materialiv — Metal Science & Treatment of Metals*. 2006, no. 4, pp. 33–35.
- [8] Savitskiy M. M., Savitskiy A. M., Suprunenko V. A., Zaytsev Val. V., Zaytsev V. V. *Opreddenie parametrov oblegchennykh stalnykh ballonov dlya gruzovoy sistemy CNG-gazovozov* [Determination of the parameters of lightweight steel cylinders for CNG carriers cargo system]. *Elektronne vydannia «Visnyk NUK» — Electronic edition “Bulletin of NUS”*. 2013, no. 1, pp. 4–14.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Мировые запасы природного газа распределены неравномерно. Между ними и потребителями зачастую лежат обширные морские акватории. Это исключает возможность сооружения морских газопроводов, поскольку сооружение глубоководных подкачивающих станций — большая проблема, а без промежуточной подкачки трубопроводы эффективны только на расстояниях до 400–600 мор. миль. На расстояниях до 3 000 миль более экономичной могла бы быть транспортировка газа в сжатом виде (CNG, КПГ) специальными судами — CNG-газовозами [1, 2], в состав грузовой системы которых должны входить облегченные стальные баллоны, материал для которых необходимо выбирать, а способы и технологии сварки для них в настоящее время необходимо разрабатывать.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В [1, 2] описаны основные достоинства и проблемы морского применения CNG-технологии. В работе [8] основное внимание уделено обоснованию преимуществ CNG-технологий и даны общие описания возможных способов сварки и выбора оборудования без конкретизации сталей для изготовления облегченных стальных баллонов для грузовой системы CNG-газовозов. Однако в этих работах не описаны перспективные материалы, способы и тех-

нологии сварки облегченных сварных баллонов для грузовой системы CNG-газовозов.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — определение перспективных материалов для изготовления облегченных стальных баллонов для грузовой системы CNG-газовозов и технологии их сварки.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Суда CNG являются новой продукцией для мирового судостроения, и пока нет четких данных об их вводе в эксплуатацию. Одним из важных элементов судов CNG является грузовая система. В соответствии с концепцией фирмы ИНТАРИ [2], она комплектуется баллонами-хранилищами, выполненными из газовых труб с толщиной стенки 40 мм из стали X80, с массогабаритным показателем $M/V = 1,7$ кг/л. По расчетам указанной фирмы оснащенное этими баллонами судно водоизмещением 84,5 тыс. т может за один рейс доставить 12 млн м³ газа.

Для доставки CNG можно использовать существующие в Украине контейнеровозы, оснастив их контейнерами с баллонами высокого давления. Для этого могут быть использованы баллоны типа автомобильных, которые представляют собой цилиндрические сосуды (рис. 1), состоящие из цельнотянутой или сварной трубной заготовки (обечайки), двух штампованных полусферических днищ, в одно из которых вварена горловина, и упрочняющей стеклопластиковой оболочки, нанесенной на цилиндрическую часть корпуса.

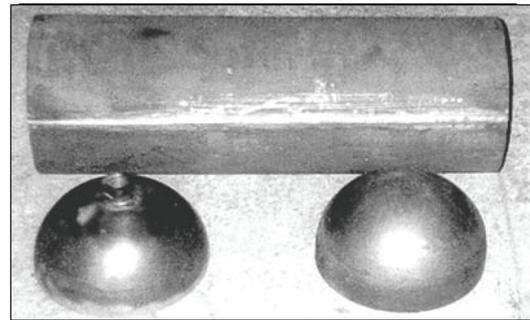


Рис. 1. Облегченный металлопластиковый баллон:
а — конструкция баллона; *б* — элементы сварного корпуса

Последняя компенсирует действие кольцевых усилий, которые в 2 раза больше осевых. Поэтому прочностные характеристики и конструктивные размеры баллонов данного типа определяются из выражения:

$$\sigma_{ст} = \frac{D_{вн}}{S_{ст}} \cdot \frac{P_p \cdot K_3}{4\phi_{шва}},$$

где $\sigma_{ст}$ — предел прочности стали; $D_{вн}$ — внутренний диаметр баллона; $S_{ст}$ — толщина стенки баллона; P_p — рабочее давление; K_3 — коэффициент запаса прочности; $\phi_{шва}$ — коэффициент прочности шва.

На рис. 2,*а* приведена зависимость соотношения между диаметром и толщиной стенки баллона при рабочем давлении 20 МПа от прочности стали, а на рис. 2,*б* — его массогабаритный показатель (M/V кг/л) при тех же условиях.

Видно, что чем выше прочность стали, тем большего диаметра может изготавливаться баллон при ограниченной толщине стенки. При этом преимущественно растет его объем, а масса увеличивается незначительно.

В результате показатель M/V (кг/л) для баллонов диаметром 219, 390 и 1020 мм можно считать ква-

зипостоянным. Длина баллонов на этот показатель влияет несущественно, в основном в сторону уменьшения вследствие уменьшения относительной доли днищ. Он зависит прежде всего от рабочего давления и прочности стали. При одинаковой прочности стали масса контейнера зависит от диаметра баллона, т.е. плотности упаковки. Укомплектование контейнеров баллонами меньшего диаметра ($\varnothing 390$ мм) позволяет лучше использовать пространство, но увеличивает суммарную массу баллонов в контейнерах (по сравнению с внутренним $\varnothing 1020$ мм). Поэтому при контейнерном варианте грузовой системы газозовов требуется оптимизация массогабаритных показателей баллонов. Одним из путей решения этой задачи может быть новая обвязка баллонов в контейнерах и контейнеров на судне, которая предусматривает при укомплектовании грузовой системы емкостями ограниченных размеров образовывать практически плавучий газопровод с единым объемом.

Для реализации этого предложения разработаны орбитальные технологии и оборудование, позволяющие в монтажных условиях сваривать и упрочнять сварные стыки труб со стеклопластиковым упрочнением. Технологии выполнения неповоротных стыков

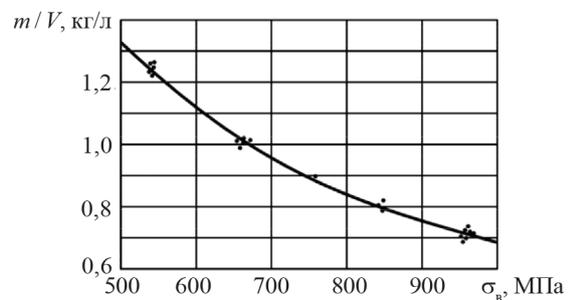
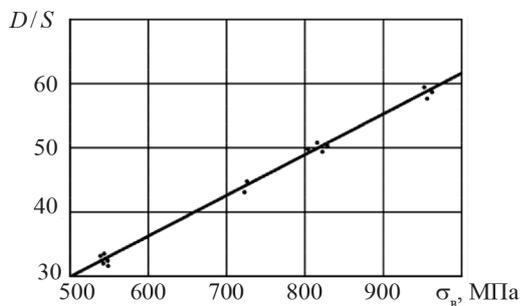


Рис. 2. Влияние прочности стали σ_b на толщину стенки лайнера и коэффициент массового совершенства:
а — зависимость отношения диаметра D к толщине обечайки S ; *б* — зависимость коэффициента массового совершенства M/V

основаны на применении автоматических способов сварки в инертных газах неплавящимся и плавящимся электродами.

Преимуществом аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (*TIG*-способ) является то, что из всех механизированных способов только она в состоянии обеспечить стабильное и качественное формирование сварных швов «на весу» (без подкладки) во всех пространственных положениях. Однако, данный способ в традиционном исполнении имеет существенный недостаток — малую проплавляющую способность дуги. Поэтому стали толщиной свыше 3 мм приходится сваривать с предварительной разделкой кромок в несколько проходов с присадочной проволокой.

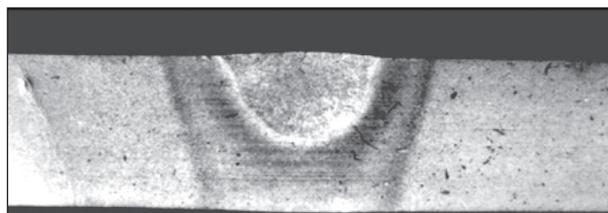
Увеличить проплавляющую способность дуги и существенно расширить технологические возможности аргонодуговой сварки позволяет применение активирующих флюсов (*ATIG*-способ), разработанных в ИЭС им. Е.О.Патона.

Незначительное количество активирующего флюса (3–5 г/погонный м шва) не влияет на химический состав сварного шва, но в 2–3 раза увеличивает проплавляющую способность дуги (рис. 3), что позволяет сваривать металл толщиной до 10–12 мм за один проход без разделки кромок и присадочной проволоки. При орбитальной сварке в силу постоянного изменения пространственного положения сварочной ванны толщина стенки трубы, свариваемой за один проход без разделки кромок, ограничивается 6 мм с формированием шва «на весу» без формирующих устройств. О качестве формирования обратной стороны сварных швов при орбитальной *ATIG*-сварке можно судить по рис. 4.

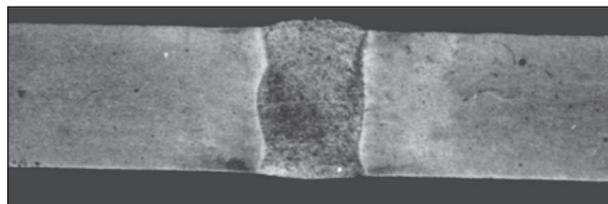
Опыт создания комбинированных сосудов высокого давления и Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ДНАОП 0.00-1.07-94), позволяют в качестве конструкционного материала для изготовления корпусов облегченных сосудов использовать стали повышенной и высокой прочности типа 30ХГСА. Они относятся к группе закаляющихся, и при их сварке требуется четкое выполнение технологических регламентов.

При изготовлении крупногабаритных баллонов высокого давления традиционные способы преодоления трудностей сварки закаляющихся сталей, основанные на применении подогрева сварных соединений и их немедленной послесварочной термической обработки, либо непригодны, либо чрезвычайно затратны.

Применение активирующих флюсов позволяет уменьшить число проходов до одного-двух и уменьшить при этом угловые деформации. Сварку сталей этого типа толщиной до 6–8 мм осуществили на погонных энергиях 7760–8070 Дж/см, при которых,



а)



б)

Рис. 3. Сварные соединения выполненные на одинаковой погонной энергии:

а — традиционным аргонодуговым способом; б — с активирующим флюсом



Рис. 4. Формирование обратной стороны шва при орбитальной *ATIG*-сварке

как свидетельствует термокинетическая диаграмма (рис. 5), превращение переохлажденного аустенита может начинаться в бейнитной области и заканчиваться в мартенситной. Значительная часть переохлажденного аустенита претерпевает превращение в промежуточной области с образованием бейнита, и в сварном соединении можно формировать структуры, представляющие собой смесь бейнита и мартенсита с различным соотношением. На рис. 6 представлена структура с примерно равным процентным соотношением этих составляющих, при которой металл характеризуется сочетанием удовлетворительных показателей вязкости, пластичности и высокой прочности (табл. 1). Это обуславливает его высокие показатели технологической прочности в процессе изготовления сосудов и конструкционной прочности при эксплуатации их в условиях малоциклового нагружения.

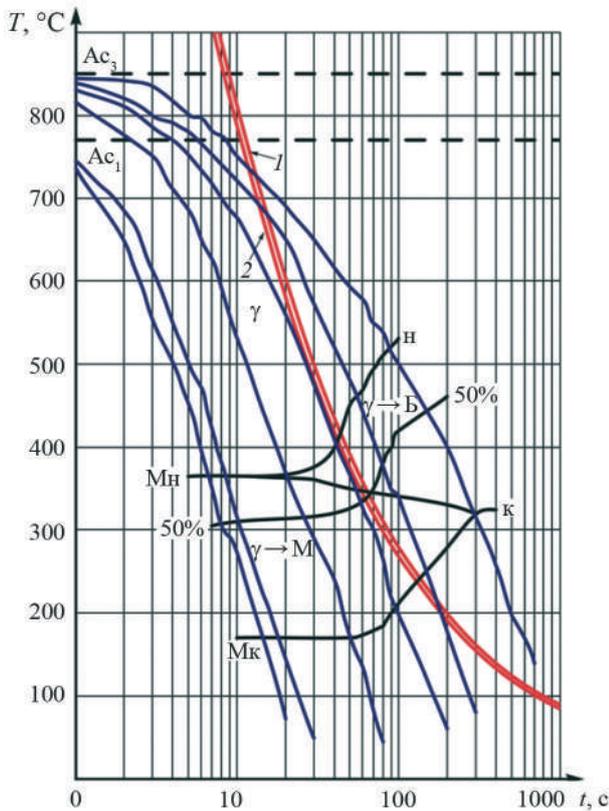


Рис. 5. Термокинетическая диаграмма превращения переохлажденного аустенита в стали 30ХГСА с максимальной температурой нагрева 1250 °С:

1 — кривая охлаждения при погонной энергии сварки 8072 Дж/см; 2 — кривая охлаждения при погонной энергии

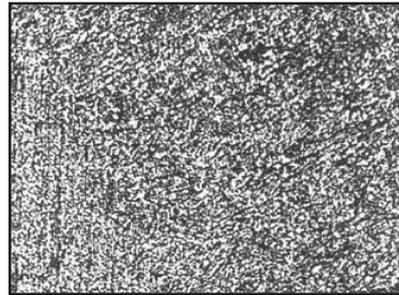
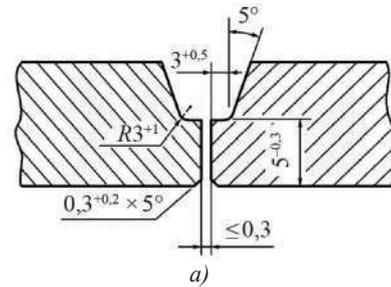


Рис. 6. Бейнитно-мартенситная структура металла ЗТВ (сталь 30ХГСА)



а)

Рис. 7. Сварка корневого прохода многопроходного шва: а — форма подготовки кромок; б — корневой проход

Таблица 1. Механические свойства металла сварных соединений, выполненных с применением активирующего флюса

Марка стали	Участок сварного соединения	σ_{T2} , МПа	σ_{B2} , МПа	δ , %	ψ , %	KCV, Дж/см ²	KCU, Дж/см ²
30ХГСА	Основной металл	—	1126	—	—	35,5	—
	ЗТВ	—	1584	—	—	39	—
	Шов	—	1596	—	—	27	—
Сталь 20	Основной металл	288,3	412,3	23,3	67,9	—	—
	Шов	374,4	499,3	22,6	71,6	100	68
	ЗТВ	—	—	—	—	116	68
09Г2С	Основной металл	280,7	455,4	16,0	64,0	—	—
	Шов	270,3	503,4	18,3	62,0	116	78
	ЗТВ	—	—	—	—	116	70
17Г1С	Основной металл	363,3	507,9	17,4	58,4	—	—
	Шов	363,3	517,8	17,3	58,6	112	89
	ЗТВ	—	—	—	—	111	72
10ХСНД	Основной металл	571,0	742,0	26,7	67,7	—	—
	Шов	702,0	779,0	21,0	65,8	—	—

Применение активирующих флюсов при сварке сталей с более низким содержанием углерода (сталь 20, 09Г2С, 17Г1С, 10ХСНД), из которых также могут изготавливаться корпуса сосудов высокого давления, также позволяет обеспечить улучшение формирования швов и структуры металла шва в зоне термического влияния шва (ЗТВ) в основном за счет улучшения условий кристаллизации шва и ослабления роста зерна в ЗТВ. Это сопровождается повышением показателей вязкости и пластичности металла при удовлетворительной прочности (табл. 1).

В случае, если толщина стенки трубы превышает 6 мм и сварку труб приходится выполнять многопроходными (многослойными) швами, используют узкую разделку кромок, форма которой приведена на рис. 7, а. Первым выполняется корневой проход толщиной до 4,5–5 мм с активирующим флюсом без присадочной проволоки (рис. 7, б). Последующие заполняющие проходы можно выполнять вольфрамовым электродом с присадочной проволокой или плавящимся электродом в защитном газе.

Снижение толщины притупления в корне шва обусловлено двумя факторами — более интенсивным отводом тепла с увеличением толщины стенки и сложностью устранения смещения кромок из-за овальности труб. В последнем случае одна из кромок уходит из-под дуги и получает меньше тепла. Ближняя кромка получает больше тепла и быстрее прогревается. В результате возникают несплавления и ухудшается формирование шва, что недопустимо для сосудов, работающих под давлением в условиях малоциклового нагружения.

Для выполнения заполняющих проходов более перспективным является применение механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах.

Если основной материал представляет собой сталь повышенной или высокой прочности типа 30ХГСА, то для выполнения заполняющих проходов целесообразно применять импульсно-дуговую сварку. Достоинством данного способа является то, что

он позволяет формировать в сварных соединениях пульсирующие термические циклы (рис. 8) с высокими скоростями нагрева, превышающими 1000 °С/с, т.е. осуществлять термоциклирование сварного соединения в процессе его выполнения. А это, как известно [3–9], оказывает положительное влияние на структуру и свойства металла сварных соединений.

При импульсно-дуговой сварке за счет термоциклирования обеспечивается формирование в сварных соединениях сталей с содержанием углерода до 0,4% структур начиная от мартенсита закалки и до бейнито-перлитных смесей (рис. 9). Это позволяет выполнять сварные соединения закаливающихся сталей без подогрева и термической обработки.

Аналогичным образом проявляется положительное влияние термоциклирования при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом с активирующим флюсом. При сварке труб из сталей, не склонных к закалке, выполнение заполняющих проходов не требует применения термоциклирования и осуществляется дугой постоянной мощности.

Таким образом, если корпуса сосудов большой емкости и трубопроводы, соединяющие их, имеют толщину стенки до 6 мм, то их сварка может осуществляться однопроходными швами неплавящимся электродом с применением активирующего флюса без предварительной разделки кромок и применения присадочной проволоки. Сварка стыка осуществляется за один полный оборот аппарата вокруг стыка.

В случае превышения указанной толщины неповоротные стыки необходимо выполнять многопроходными швами с предварительной разделкой кромок. Первый проход — корневой — выполняется АТИГ-способом, а заполняющие проходы — сваркой плавящимся электродом в защитных газах. Корневой проход выполняется за один полный оборот аппарата вокруг стыка, а заполняющие — за два полуоборота в направлении сверху вниз. Такая техника сварки обеспечивает лучшие условия формирования сварного шва в положениях на «3» и «9» часов.

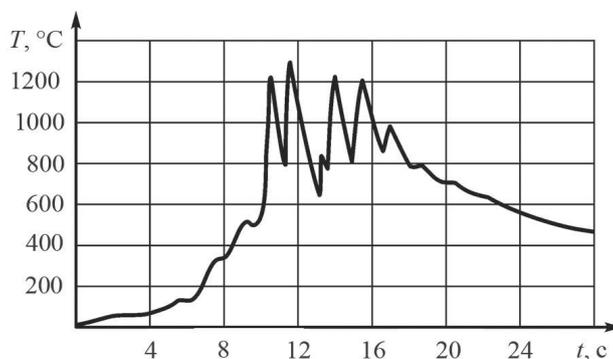
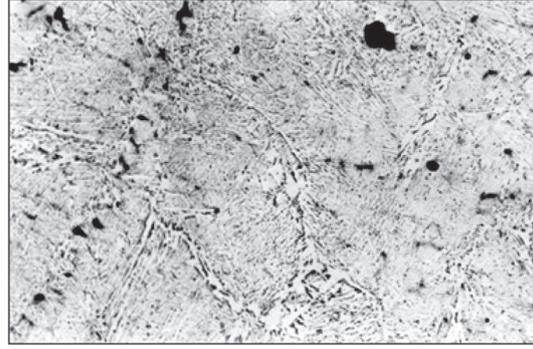


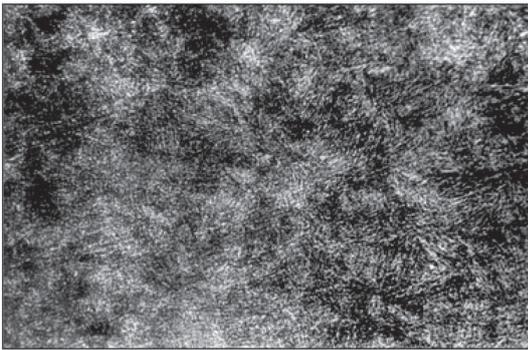
Рис. 8. Пульсирующий термический цикл в ЗТВ сварного соединения при импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов



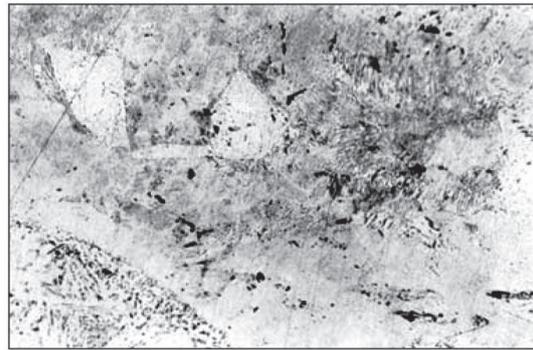
а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Микроструктуры ($\times 400$) металла сварных соединений стали с содержанием углерода до 0,4%, выполненных с термоциклированием импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом в защитных газах:

а — мартенсит закалки; б — мартенсит отпуска; в — бейнит; г — смеси бейнита и перлита

Если хотя бы один из свариваемых элементов изготовлен из закаливающих сталей, сварку неповоротного стыка необходимо выполнять импульсной дугой с термоциклированием.

По аналогии со сварочным оборудованием разработано также и оборудование для упрочнения композитом стыков баллонов и труб орбитальной намоткой в условиях монтажа.

ВЫВОДЫ. 1. Корпуса сосудов большой емкости и трубопроводы, соединяющие их, с толщиной стенки до 6 мм свариваются однопроходными швами неплавящимся электродом с применением активирующего флюса без предварительной разделки кромок и применения присадочной проволоки.

2. При большей толщине стенки труб неповоротные стыки выполняются многопроходными швами

с предварительной разделкой кромок. Первый проход — корневой — выполняется АТИГ-способом, а заполняющие проходы — сваркой плавящимся электродом в защитных газах.

3. Если хотя бы один из свариваемых элементов изготовлен из закаливающих сталей, сварку неповоротного стыка необходимо выполнять импульсной дугой с термоциклированием.

4. Для реализации орбитальной сварки неплавящимся и плавящимся электродами разработано соответствующее оборудование с программным управлением, охватывающее диапазон диаметров от 20 мм до 1420 мм.

5. По аналогии со сварочным оборудованием разработано оборудование для упрочнения стыков баллонов и труб орбитальной намоткой в условиях монтажа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Крижанівський, Є. І. Концепція альтернативного постачання природного газу до України [Текст] / Є. І. Крижанівський, Вал. В. Зайцев // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ». — Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. — № 4 (37). — С. 5–13.
- [2] Зайцев, Вал. В. Аналіз особливостей вимог класифікаційних обществ к судам, перевозячим сжатий природний газ [Текст] / Вал. В. Зайцев, В. В. Зайцев, Е. В. Котова, К. С. Скрипниченко // Зб. наук. праць НУК. — 2010. — № 5 (434). — С. 11–18.

- [3] **Вагнер, Ф. А.** Термоциклирование при сварке вольфрамовым электродом [Текст] / В.А. Вагнер // Сварочное производство. — 1980. — № 2. — С. 4–6.
- [4] **Дудко, Д. А.** Особенности тепловых процессов при сварке с термоциклированием [Текст] / Д. А. Дудко, А. М. Савицкий, М. М. Савицкий, Е. М. Олейник // Автоматическая сварка. — 1998. — № 4. — С. 8–12.
- [5] **Савицкий, А. М.** Влияние стадии нагрева на формирование структуры сварных соединений закаливающих сталей [Текст] / А. М. Савицкий, В. Г. Васильев, М. М. Савицкий, В. Н. Ващенко // Автоматическая сварка. — 2005. — № 1. — С. 19–21.
- [6] **Савицкий, О. М.** Вплив швидкісних нагрівів на структуру вуглецевих сталей при локальній термічній дії [Текст] / О. М. Савицький // Металознавство та обробка металів. — 2005. — № 4. — С. 33–35.
- [7] **Савицький, О. М.** Керування структуроутворенням у вуглецевих сталях при локальному термічному впливові [Текст] / О. М. Савицький // Металознавство та обробка матеріалів. — 2006. — № 4. — С. 33–35.
- [8] **Савицкий М. М.** Определение параметров облегченных стальных баллонов для грузовой системы CNG-газовозов [Текст] / М. М. Савицкий, А. М. Савицкий, В. А. Супруненко, Вал. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Електронне видання «Вісник НУК, зб. наук. праць». — 2013. — № 1. — С. 4–14.

© В. В. Зайцев, М. М. Савицький, О. М. Савицький та інш.

Надійшла до редколегії 24.07.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *В. Ф. Квасницький*