

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 БАЛОНІВ ДЛЯ CNG-ГАЗОВОЗІВ

Volodymyr V. Zaytsev
zvvl949@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*Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, г. Николаєв*

²*Інститут електросварки НАН України, г. Київ*

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. *Kontseptsiiia 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 rodovysch» — 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. *Opreделение 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 глубинных 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, КПП) 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.

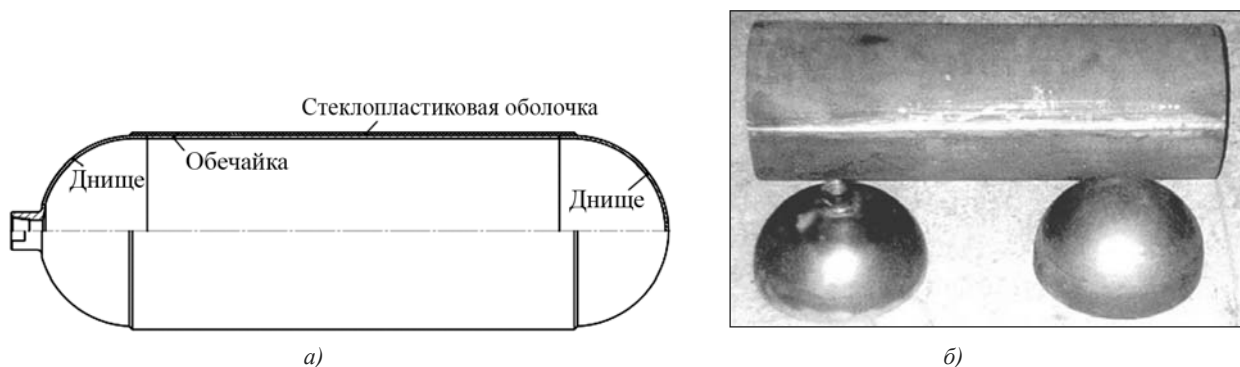


Рис. 1. Облегченный металлопластиковый баллон:

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:

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{D_{\text{вн}}}{S_{\text{ст}}} \cdot \frac{P_{\text{р}} \cdot K_3}{4\varphi_{\text{шва}}},$$

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

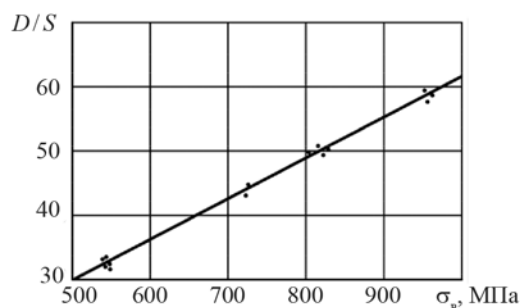
На рис. 2, а приведена зависимость соотношения между диаметром и толщиной стенки баллона при рабочем давлении 20 МПа от прочности стали, а на рис. 2, б — его массогабаритный показатель (M/V кг/л) при тех же условиях.

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.

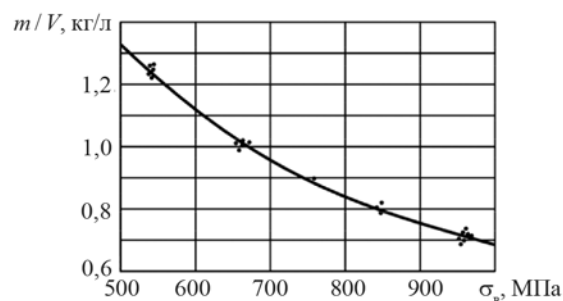
В результате показатель M/V (кг/л) для баллонов диаметром 219, 390 и 1020 мм можно считать ква-

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 газовозов 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



а)



б)

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.

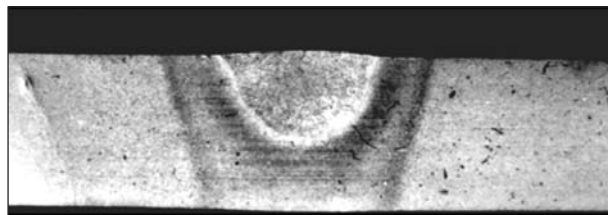
Увеличить проплавляющую способность дуги и существенно расширить технологические возможности аргонодуговой сварки позволяет применение активирующих флюсов (*ATIG*-способ), разработанных в ИЭС им. Е.О.Патона.

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.

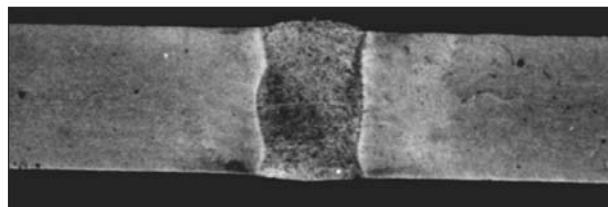
Опыт создания комбинированных сосудов высокого давления и Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ДНАОП 0.00-1.07-94), позволяют в качестве конструкционного материала для изготовления корпусов облегченных сосудов использовать стали повышенной и высокой прочности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

При изготовлении крупногабаритных баллонов высокого давления традиционные способы преодоления трудностей сварки закаливающихся 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

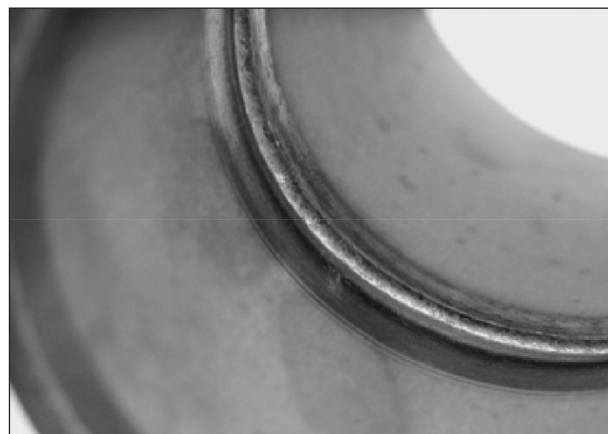


Рис. 4. Формирование обратной стороны шва при орбитальной *ATIG*-сварке

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.

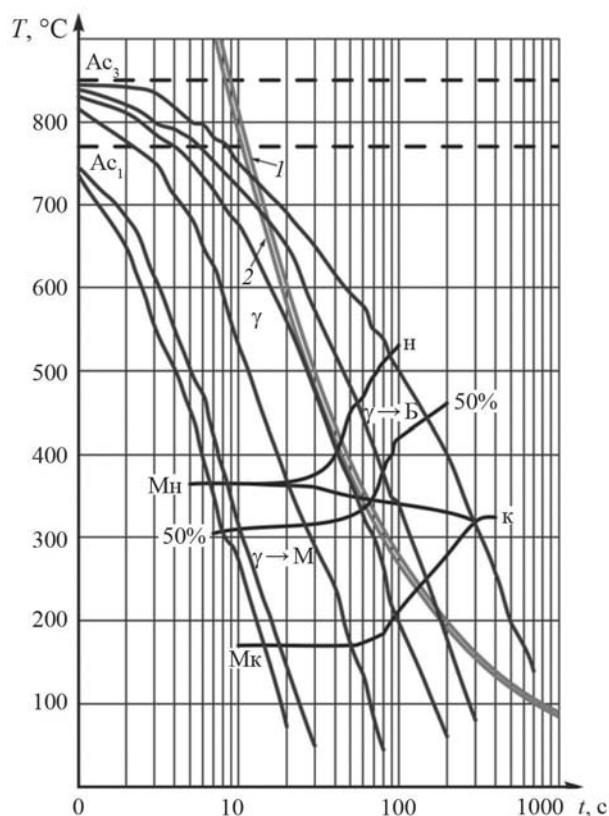


Рис. 5. Термокинетическая диаграмма превращения переохлажденного аустенита в стали 30ХГСА с максимальной температурой нагрева 1250 °С:

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

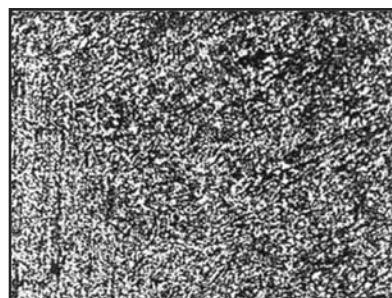
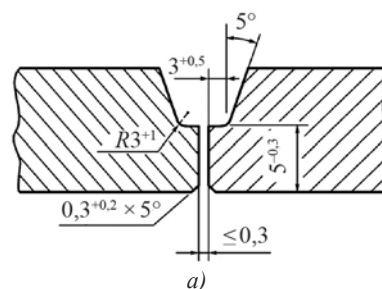


Рис. 6. Бейнитно-мартенситная структура металла ЗТВ (сталь 30ХГСА)



б)

Рис. 7. Сварка корневой 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	$\sigma_{\text{г}}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, 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.

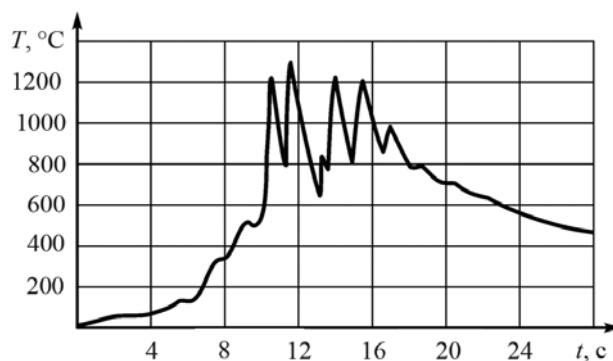


Рис. 8. Пульсирующий термический цикл в ЗТВ сварного соединения при импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов

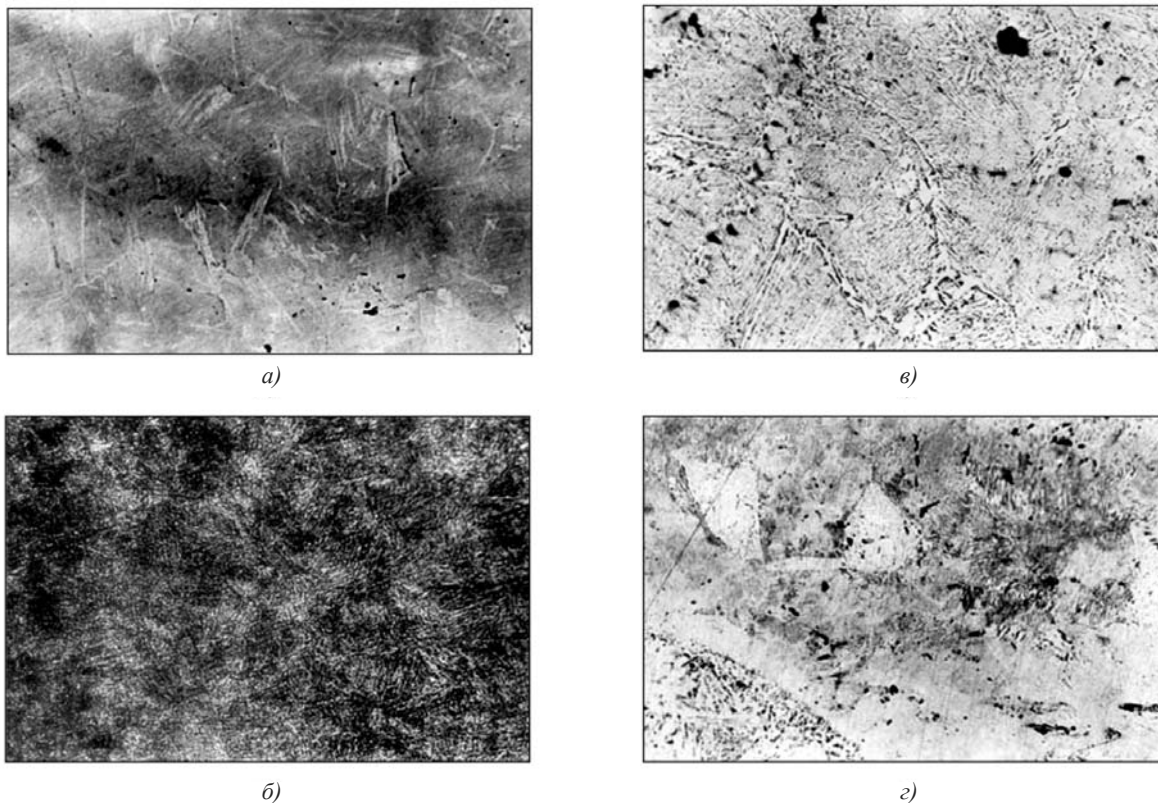


Рис. 9. Микроструктуры ($\times 400$) металла сварных соединений стали с содержанием углерода до 0,4%, выполненных с термоциклированием импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом в защитных газах:

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

Если хотя бы один из свариваемых элементов изготовлен из закаливающихся 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 однопроводными 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 закаливающихся 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. Анализ особенностей требований классификационных обществ к судам, перевозящим сжатый природный 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] **Савицький, 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.

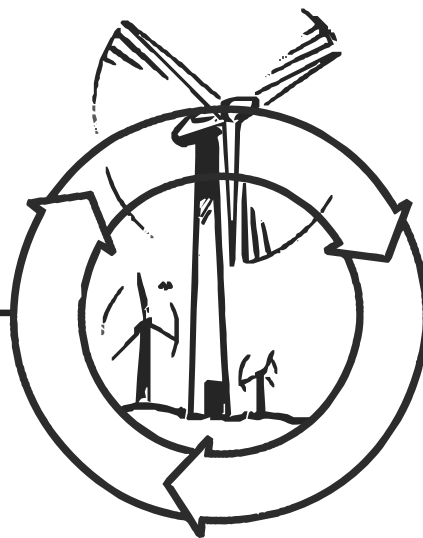
© В. В. Зайцев, М. М. Савицький, О. М. Савицький та інш.

Надійшла до редколегії 24.07.2015

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

ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

Буравченко К. О.
Глиняна В. В.
Гурець Н. В.
Демченко О. М.
Крива М. С.
Маркіна Л. М.
Радіонов А. В.
Ремешевська І. В.
Рижков С. С.
Сидоренко В. В.
Трохименко Г. Г.
Циганюк Н. В.



Збірник
наукових праць
2015