



ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОРПУСОВ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

М. М. САВИЦКИЙ, А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, доктора техн. наук, **Е. М. САВИЦКАЯ**, канд. техн. наук,
С. И. ПРИТУЛА, С. К. БАБЕНКО, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны конструкция и технология изготовления комбинированных баллонов высокого давления с массогабаритным показателем $M/V \leq 0,65$ кг/л, предназначенных для использования на автотранспорте. Баллон состоит из герметичного корпуса и упрочняющей композиционной оболочки. Для изготовления корпуса баллона, сваренного из тонколистового стального проката, разработаны нестандартное сборочно-сварочное оборудование и технология прецизионной сварки, последующего контроля и термообработки сварных соединений. Созданы технологические линии производительностью до 20 и 100 тыс. баллонов в год с запасом прочности их свыше 2,6.

Ключевые слова: дуговая сварка, автотранспортные баллоны, высокое давление, долговечность оборудования и технологии сварки, прямошовные и спиральношовные обечайки, технологические линии

Природный газ–метан является одним из наиболее распространенных и перспективных энергоносителей на Земле. Его разведанные запасы приближаются к 10^{12} , а прогнозируемые (с учетом гидратов) к $10^{15} \dots 10^{16}$ км³ [1]. Добыча и подготовка к использованию газа экономически и экологически менее затратны по сравнению с нефтью, а сжигание обуславливает более низкое (в 1,5...2,5 раза) содержание оксидов углерода и азота, а также ароматических углеводородов в продуктах сгорания [2]. Кроме того, стоимость газа примерно в 2 раза ниже стоимости бензина, а его использование в качестве моторного топлива не требует изменения конструкции двигателей и не исключает возможности их эксплуатации на газе, бензине или их смесях [3]. При этом некоторые неудобства доставляет размещение дополнительных заправочных емкостей (баллонов высокого давления) на борту автомобиля. В связи с этим некоторые фирмы доработали конструкцию кузовов и начали выпуск автомобилей со встроенными баллонами.

Требования к баллонам достаточно высокие [4] и для их производства необходим определенный уровень технологической дисциплины и механизации работ. Это является предпосылкой для организации высокотехнологичных производств, а современные темпы автомобилизации мира и расхода нефтересурсов позволяют прогнозировать перспективность этих производств. Кроме того, около 900 млн зарегистрированных транспортных средств выбрасывают до 60 % всех загрязнений

в окружающее пространство. Поэтому на данном этапе применение газа в качестве моторного топлива позволит существенно снизить загрязнение среды обитания и отдалить коллапс автомобильной промышленности из-за исчерпания запасов нефти, а также разработать более приемлемые решения, например, получение топлива, в том числе газа, из возобновляемых источников, гибридные автомобили «газ–электроэнергия» и т. п.

Проблемой газификации автотранспорта занимались еще в прошлом веке, но это были в основном пионерные проекты, которые позволили накопить опыт и подготовить базу для перехода к масштабным решениям.

В настоящее время на природном газе эксплуатируется около 9 млн автомобилей, в которых в основном используется сжатый газ, поскольку существующие криобаки для сжиженного метана не обеспечивают его длительное хранение на борту, а большинство автомобилей используется с достаточно большими перерывами, т. е. отсутствует альтернатива баллонам высокого давления.

На данном этапе большое распространение получили стальные баллоны, изготовленные из цельнотянутой трубной заготовки путем горячей завальцовки концов [5]. Эта технология была ранее отработана на баллонах для технических газов и привлекает производителей доступностью и простотой. Однако организовать в Украине массовое производство этих баллонов пока не удастся из-за трудности получения трубной заготовки без расслоений и с малыми допусками на толщину стенки. Кроме того, формирование днищ завальцовкой можно осуществлять только при определенном отношении диаметра к толщине стенки трубы. Это ограничивает возможность изготов-

ления баллонов различных типоразмеров со стабильным массогабаритным показателем (отношение массы к объему M/V) не более 1 кг/л. Дальнейшее снижение и стабилизация этого показателя реализовано в конструкции металлопластикового баллона со сварным корпусом из листового проката, предложенной ИЭС им. Е. О. Патона и Институтом механики [6]. Корпус состоит из прямошовной обечайки и приваренных к ней кольцевыми швами двух штампованных полуэллиптических днищ, в одно из которых вварена горловина. Поскольку корпус изготавливается из малопрочных низколегированных сталей (обечайка из стали 09Г2СФ толщиной 3 мм, а днища — из стали 09Г2С толщиной 6 мм), его усиливают несущей стекловолоконной оболочкой типа «кокон», выполненной по схеме продольно-поперечной намотки. Баллон имеет стабильный массогабаритный показатель $M/V \approx 0,9$ кг/л, запас прочности не менее 2,6 и выдерживает до 40 тыс. заправок.

С точки зрения владельцев легкового транспорта баллоны данной конструкции имеют избыточную массу, а производителей — требуют повышенных затрат на формирование композиционной оболочки. Дальнейшее усовершенствование конструкции осуществили на основе высокопрочных сталей [7]. При этом использовали полусферические днища, в которых рабочие напряжения в 2 раза ниже, чем в цилиндрической части корпуса, что позволило отказаться от их дополнительного усиления, а равнопрочность всех элементов конструкции обеспечить кольцевой намоткой цилиндрической части баллона [8, 9]. Это существенно упростило технологию и оборудование для формирования оболочки.

Необходимый запас прочности новых баллонов в значительной мере определяется механическими свойствами стали, которые задаются исходной структурой и режимами термической обработки металла [10]. При статическом и динамическом нагружении внутренним давлением проблема равнопрочности сварных соединений была решена для различных уровней прочности, вплоть до 2000 МПа [11]. Однако при малоцикловом нагружении возможность использования такого решения не была подтверждена [12]. Негативную роль здесь играло несовершенство геометрических размеров соединения. Известно, что при сборке тонкостенных элементов корпуса весьма сложно обеспечить идеальную сборку свариваемых кромок вследствие овализации деталей после вальцевания и штампования. В результате нарушается плавность перехода от шва к основному металлу и увеличивается вероятность образования высоких локальных концентраций напряжений при рабочих нагрузках, что приводит к развитию микропластических деформаций и

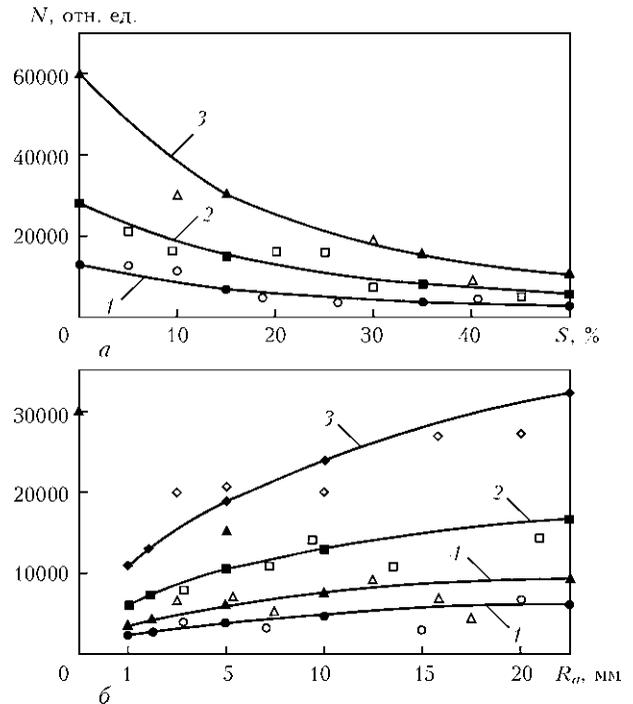


Рис. 1. Зависимость долговечности баллона от геометрических параметров сварного соединения: смещения кромок (а) и радиуса сопряжения шва с основным металлом (б) при различных уровнях относительного удлинения металла: 1 — $\delta = 8$; 2 — 12; 3 — 18; 4 — 10 %; светлые значки — реальные баллоны

преждевременному исчерпанию запаса прочности металла в ограниченных участках.

Достижимое количество циклов нагружения (СТ СЭВ 3648–82) $[N]$ определяется выражением

$$[N] = \frac{1}{n_N} \left[\frac{A}{\left(\sigma_A - \frac{B}{n_\sigma} \right)} \left(\frac{2300 - t}{2300} \right) \right]^2,$$

где n_N — коэффициент запаса прочности по количеству циклов; A, B — характеристики материала; σ_A — амплитуда напряжений; n_σ — коэффициент запаса прочности по напряжениям; t — температура.

Долговечность сварных соединений существенно зависит от таких геометрических параметров, как смещение кромок (рис. 1, а) и радиус сопряжения шва с основным металлом (рис.1, б). Эта зависимость тем больше, чем ниже пластичность (относительное удлинение δ) металла. Полученные расчетные данные удовлетворительно коррелируют с результатами гидравлических испытаний реальных баллонов (светлые значки), в которых значения смещений кромок и радиусов сопряжений определяли после разгерметизации баллонов в местах образования усталостных трещин.

Для устранения дилатации кромок в серийном производстве баллонов разработано сборочно-сварочное оборудование, которое позволяет

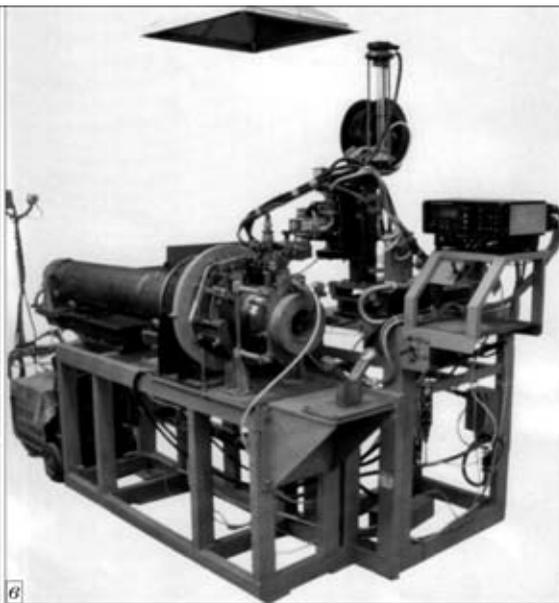
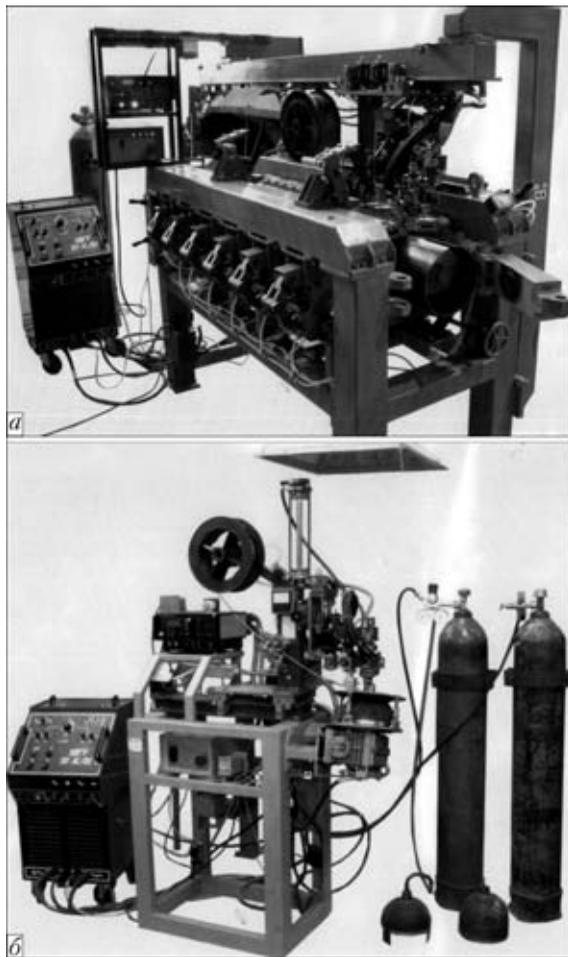


Рис. 2. Оборудование для сборки и сварки корпусов баллонов: *а* — установка для сварки продольных швов; *б* — установка для сварки обечайки с днищами; *в* — установка для сварки штуцеров

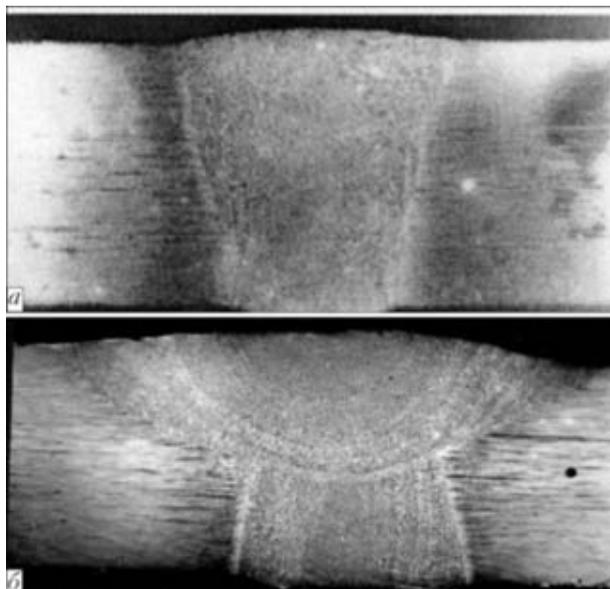


Рис. 3. Макрошлифы одно- (*а*) и двухслойного (*б*) швов

упруго деформировать детали при сборке, устраняя овальность и формируя сварные соединения с минимальным ($\delta \geq 10\%$) смещением кромок (рис. 2). Сварка на данном оборудовании выполняется с одной стороны за один или два прохода (рис. 3, *а*). При первом проходе, который выпол-

няется с полным проплавлением кромок, формируется несущий шов, который соответствует по химическому составу основному металлу. При втором проходе обеспечиваются оптимальная ширина и высота усиления шва и, следовательно, необходимый радиус его сопряжения с основным металлом. С этой целью сварку первого прохода проводят в аргоне с применением специального активирующего флюса, повышающего проплаляющую способность дуги на пониженных токах и позволяющего проплалять за один проход без разделки кромок сталь толщиной до 10 мм. Это позволяет предупредить образование в металле шва и ЗТВ грубых закалочных структур, а также дефектов типа пор, непроваров, несплавлений, трещин и формировать при первом проходе несущие швы I, II класса по ГОСТ 23055–78 с химическим составом, аналогичным основному металлу. Второй проход выполняется с присадочной проволокой и может быть использован для улучшения геометрии, структуры и пластичности металла шва. Соответствие шва требуемому классу качества оценивается 100%-м рентгеновским методом.

Сравнительные испытания, проведенные одной из зарубежных фирм, показали, что соединения микролегированной стали, выполненные по

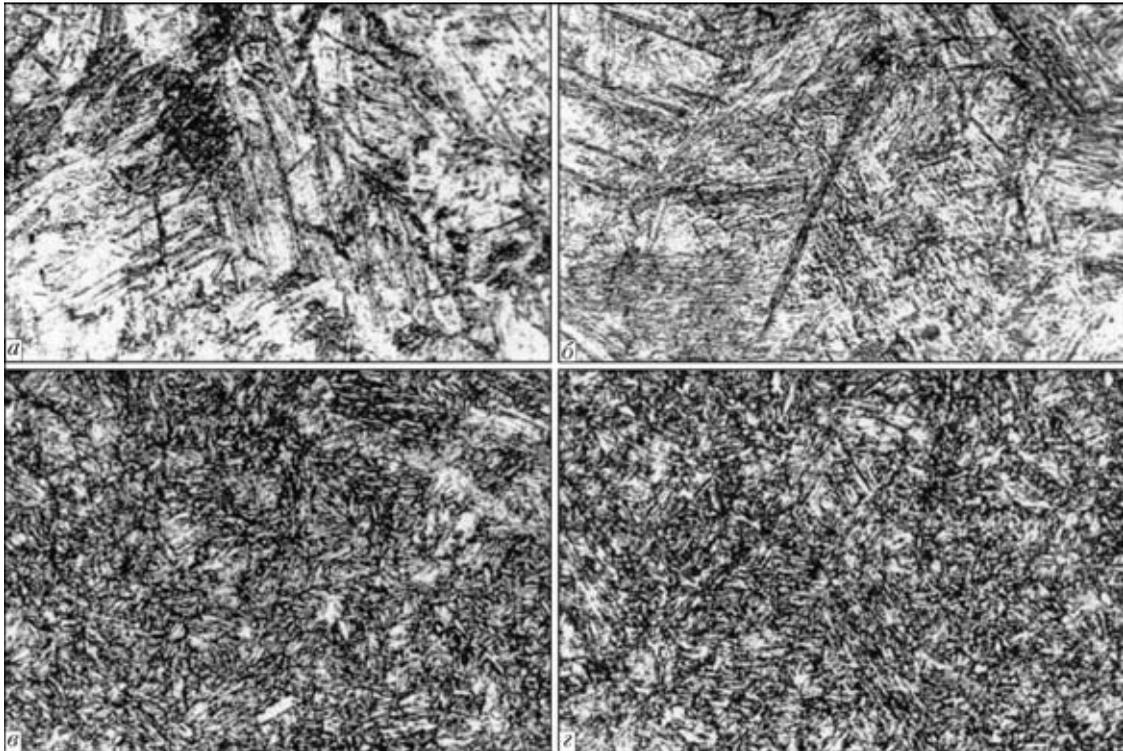


Рис. 4. Микроструктуры (X300) металла шва и ЗТВ после сварки (а, б) и местной термообработки (в, з)

описанной технологии, превосходят соединения, сваренные плазмой, электронным лучом, лазером, плавящимся электродом в смесях газов и неплавящимся электродом в аргоне. Они имеют более высокую сопротивляемость образованию усталостных трещин при малоцикловом нагружении. Что касается среднеуглеродистых сталей, закаливающихся с образованием мартенсита, здесь оказалось, что в ряду факторов, определяющих сопротивляемость усталостному разрушению стыковых соединений высокопрочной стали, важное место занимает исходная структура металла шва и ЗТВ, вернее то, насколько ее можно преобразовать и приблизить к структуре основного металла после финальной обработки. Установлено, что если при послесварочной обработке соединений сталей типа 25СНМВФА или 30ХГСА бейнитно-мартенситную структуру закаленного со сварочного нагрева металла шва и ЗТВ преобразовать в относительно равновесную структуру сорбита отпуска (рис. 4), то после закалки исчезает текстура литого металла шва и измельчается аустенитное зерно в участке перегрева металла ЗТВ. В результате нивелирования различия структур основного металла и соединения увеличивается долговечность баллонов от 1600...1800 до 25000...30000 заправок.

Весьма ответственной операцией в технологической цепочке является неразрушающий контроль сварных соединений. Организация контроля методом рентгеноскопии требует защищенных от излучения рабочих мест, финансовых и временных затрат, что в условиях серийного производ-

ства приводит к образованию узких мест в потоке. Перспективным дополнением к рентгеновскому контролю в серийном производстве баллонов высокого давления является новый метод — сдвиговая спекл-интерферометрия, или широкография [13, 14]. Он позволяет оперативно за несколько минут получать полную информацию о техническом состоянии исследуемого объекта и определять потенциально дефектоопасные места, которые затем выборочно следует контролировать рентгеновским методом.

Основной принцип широкографии заключается в том, что контролируемый участок баллона подвергают нагружению внутренним давлением или внешним нагревом и освещают когерентным лазерным лучом. Отраженный поток света в интерферометре разделяется со сдвигом на два волновых фронта, преобразуется в электрический сигнал и передается для дальнейшей обработки в компьютер. Результаты записываются на электронные носители и могут служить как целеуказание для последующей идентификации дефекта стандартными рентгеновскими методами. Этот метод, очевидно, можно применить и для оценки состояния баллонов при их периодическом пересвидетельствовании. Спекл-картины, записанные при первоначальном контроле, можно сопоставить с картинками, полученными после определенного периода эксплуатации и по ним определять ресурс баллонов.

Как показали исследования [14], при упругодеформированном состоянии объекта можно выявлять не только фиксируемые при рентгеногра-

фировании дефекты, но и локальные концентрации напряжений, обычно отсутствующие на рентгенограммах, но влияющие на долговечность и надежность баллонов.

На основе разработанных конструкций комбинированных баллонов, комплекса технологий и нестандартного оборудования создана технологическая линия сборки, сварки, контроля и термической обработки корпусов баллонов из листового проката (рис. 5, а), а также формирования композиционной оболочки. Линия этого типа позволяет организовать современное производство комбинированных баллонов с прямошовной обечай-

кой производительностью до 24 тыс. в год. Масогабаритный показатель этих баллонов составляет около 0,65 кг/л. Заводская стоимость баллонов в 2 и более раза ниже стоимости аналогичных баллонов зарубежного производства.

К недостаткам прямошовной обечайки обычно относят вероятность расположения вдоль образующей физических и геометрических несовершенств продольного шва, а также несбалансированность жесткости и остаточных напряжений при том, что уровень рабочих напряжений от радиальных усилий в обечайке в 2 раза выше осевых. Для устранения этих недостатков техноло-

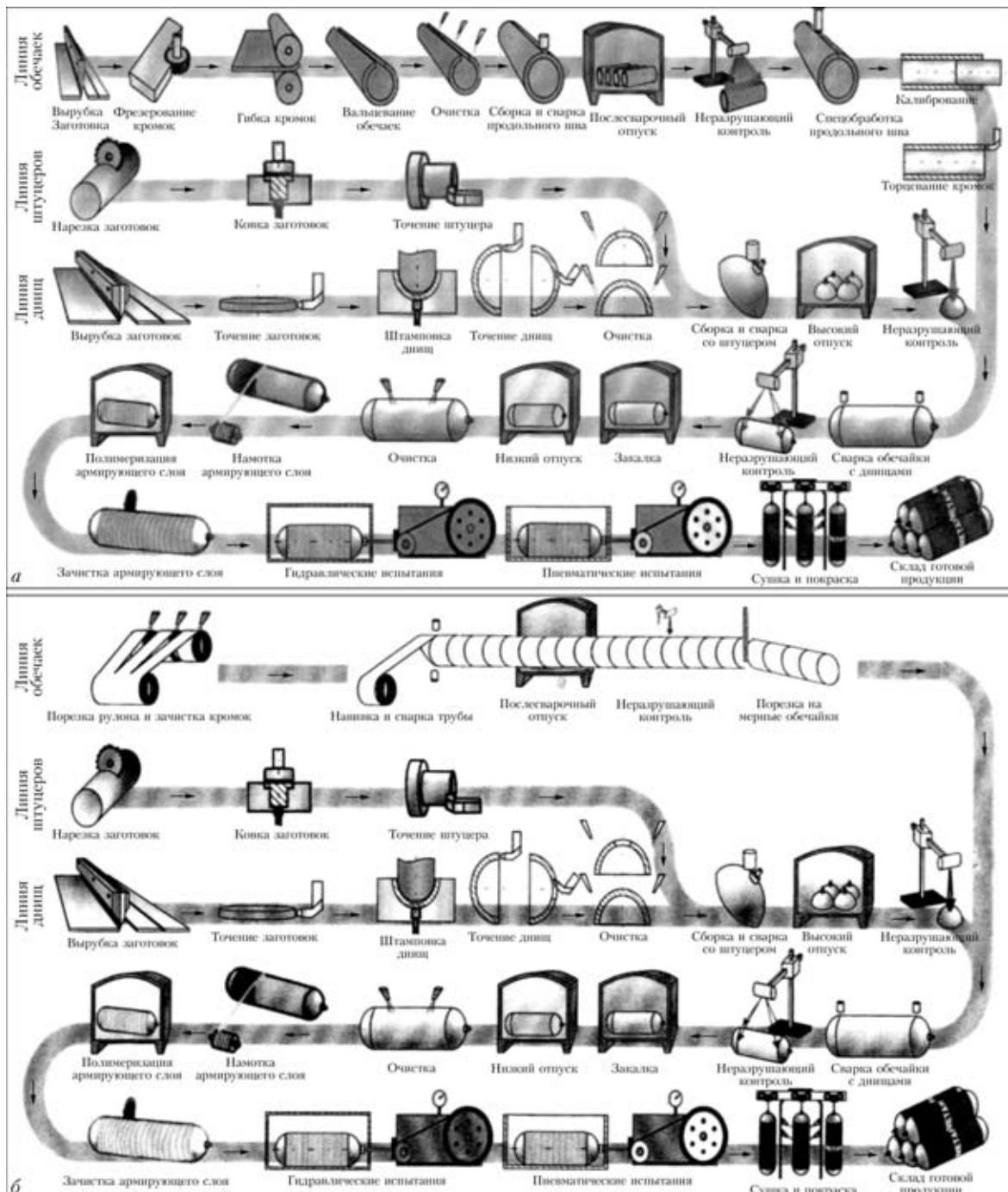


Рис. 5. Технологическая линия изготовления баллонов с прямо- (а) и спиральношовной (б) обечайками

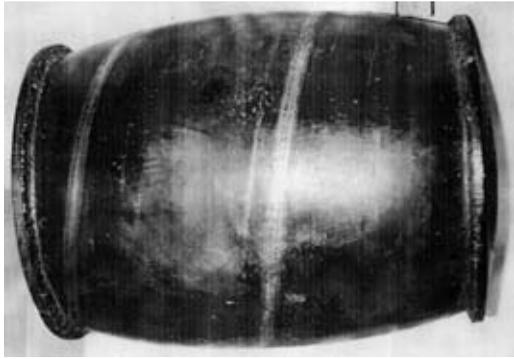


Рис. 6. Внешний вид макета корпуса спиральношовного баллона после испытаний внутренним давлением

гией предусмотрены предварительная гибка кромок, механотермическая обработка соединения и последующее калибрование обечайки. В целом это позволило обеспечить равнопрочность всех участков обечайки и повысить однородность распределения в них рабочих напряжений, но привело к увеличению количества технологических операций.

Спиральношовная обечайка в меньшей степени подвержена влиянию отмеченных факторов, поскольку векторы радиальных напряжений не перпендикулярны к плоскости шва, а зоны повышенной жесткости и упругопластических деформаций не сосредоточены в одной плоскости [15], что исключает необходимые калибрования. Кроме того, совмещение в одном механизме операции формирования и сварки стыка позволяет отказаться от гибки кромок и промежуточной транспортной операции.

С целью дальнейшего сокращения производственного цикла, снижения себестоимости и наращивания производства баллонов предлагается также технологическая линия второго типа (рис. 5, б), отличительной особенностью которой является возможность применения высокопроизводительного способа высокочастотной сварки [16].

Оборудование разработано и прошло испытание при сварке труб специального назначения. Постановка оборудования в линию производства баллонов позволяет объединить в одной установке до пяти технологических операций, в том числе формирование, сварку и горячую обработку трубной заготовки и отменить еще три операции как не востребуемые. В качестве источника нагрева может быть использована также сварочная дуга при некотором снижении скорости изготовления трубной заготовки. Это позволит сбалансировать нагрузку всех элементов линии в условиях мелкосерийного производства или нестабильного спроса на продукцию. В условиях крупносерийного или массового производства целесообразно использовать высокочастотную сварку, основные характеристики которой представлены в таблице.

Диаметр свариваемых труб в зависимости от толщины и ширины ленты заготовки

Диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм	Ширина ленты, мм
75...100	0,5...1,5 (2,5)*	100
100...200	0,8...2,0 (3,0)	100
200...250	0,8...2,5 (3,5)	200
300...700	1,0...3,0 (4,5)	200, 300, 500 (зависит от типа установки)

* При мощности генератора тока высокой частоты 250 кВт.

В настоящее время разработаны производственная технология и конструкторская документация на оборудование для сварки спиральношовных труб диаметром от 75 до 700 мм в цеховых условиях. Изготовленные из этих труб и испытанные макеты корпусов баллонов различного назначения дали положительный результат. Внешний вид макета корпуса баллона после испытаний внутренним давлением представлен на рис. 6.

Основные технические характеристики оборудования в режиме высокочастотной сварки следующие:

Скорость сварки, м/мин	30...40
Скорость выхода трубы, м/мин	8...12
Производительность, км труб в смену	1,0...1,5
Мощность генератора тока высокой частоты, кВт	160...250
Мощность электроприводов, кВт	8
Длина труб, м	любая
Напряжение питания электрооборудования (50 Гц), В	380
Свариваемые материалы	сталь, алюминий
Площадь, занимаемая линией сварки, м ²	150...200

В заключение отметим, что разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона конструкция, технологии сварки и термообработки, а также нестандартное сборочно-сварочное оборудование позволяют изготавливать комбинированные сварные баллоны со стабильным массогабаритным показателем $M/V = 0,65$ кг/л и долговечностью более 15000 заправок. По ТУ 28.2-05416923-072:2005 изготовлена серия баллонов с запасом прочности (отношением давления разгерметизации $P_{раз}$ к давлению рабочему $P_{раб}$), равным более 2,6, который сохраняется стабильным после 15 тыс. заправок.

Для организации серийного производства баллонов с прямошовной обечайкой может быть использована технологическая линия первого типа. При необходимости массового выпуска баллонов целесообразно использовать линию второго типа, основанную на изготовлении спиральношовной обечайки.

1. Стан і перспективи розвитку нафтогазового комплексу України / І. М. Карп, Д. О. Єгер, Ю. О. Зарубін та ін. — Київ: Наук. думка, 2006. — 310 с.



2. Matsuyama K. Trend of automobile vehicles and the joining technologies // Riv. Ital. Saldatura. — 2007. — № 5. — S. 683–693.
3. Волков В., Каплун С. В., Зера А. В. Новый шаг в использовании КПГ в качестве моторного топлива // Автозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2007. — № 6. — С. 57–58.
4. Соглашение о принципах единообразия технических предписаний для комплексных транспортных средств, предметов оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах, и об условиях возможного признания официальных утверждений, выдаваемых на основе этих предписаний // ООН, E/ЕСЕ/ТРАНС/505. Rev.2/Add tog 12 июня 2001. — 42 с.
5. Сахатов Р. М. Безосколочные металлокомпозитные баллоны БМК-300В и другие // Автозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2009. — № 4. — С. 51–54.
6. Конструкция и технология изготовления металлопластиковых баллонов / В. А. Полевой, В. И. Озеров, А. А. Савиченко, Я. М. Юзькив // Газовая пром-сть. — 1992. — № 11. — С. 30–31.
7. Патон Б. Е., Савицкий М. М., Кузьменко Г. В. Перспективы применения высокопрочных среднелегированных сталей в сварных баллонах высокого давления для автотранспорта // Автомат. сварка. — 1994. — № 3. — С. 4–9.
8. Пат. 44793 Україна. Балон комбінований / М. М. Савицький, В. М. Кулик, А. П. Лупан, Г. М. Мельничук. — Бюл. № 3. — Оpubл. 15.03.2002.
9. Пат. 82000 Україна. Балон / М. М. Савицький, В. М. Кулик, О. О. Савиченко та ін. — Бюл. № 4. — Оpubл. 25.02.2008.
10. Покровская Н. Г., Петраков А. Ф., Шалькевич А. Б. Современные высокопрочные стали для изделий авиационной техники // Металловедение и терм. обработка металлов. — 2000. — 3, № 2. — С. 23–26.
11. Савицкий М. М. Свариваемость легированных сталей повышенной чистоты // Матер. междунар. семинара по металлургическим требованиям производителей и потребителей к свариваемости стальной продукции. — Киев, 1991. — С. 10–15.
12. Куркин С. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. — М.: Машиностроение, 1976. — 177 с.
13. Электронная ширография — новый метод диагностики материалов и конструкций / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // В мире неразруш. контроля. — 2003. — № 4. — С. 67–69.
14. Олійник О. М. Неруйнівний контроль машинобудівних конструкцій методом електронної ширографії: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Ів.-Франківськ: НТУ нафти і газу, 2004. — 16 с.
15. Письменный А. С., Полухин В. В., Полухин Вл. В. Производство спиральношовных труб // Автомат. сварка. — 2005. — № 9. — С. 32–36.
16. Письменный А. С. Высокопрочная сварка металлических изделий / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2008. — 172 с.

The E.O.Paton Electric Welding Institute developed the design and technology for manufacture of high-pressure combined motor transport cylinders with mass-capacity ratio $M/V \leq 0.65$ kg/l. A cylinder consists of a pressurised body and strengthening composite sheath. Bodies of the cylinders, which are welded from sheet steel, are manufactured by using the specially developed ingenious assembly-welding equipment and technology, subsequent inspection and heat treatment of welded joints. The production lines were built, having an annual capacity of up to 20,000 and 100,000 cylinders and providing their safety factor for strength of more than 2.6.

Поступила в редакцию 19.02.2010

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

объявляет ежегодный набор в

ДОКТОРАНТУРУ по специальностям:

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металлостроение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

АСПИРАНТУРУ по специальностям:

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металлостроение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

Прием в аспирантуру проводится в сентябре.

Контактный телефон: 289-84-11

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): [www: paton.kiev.ua](http://www.paton.kiev.ua)

Документы направлять по адресу:

03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю