

5. Статистическая оценка деградации свойств материала нефтепровода / Сосновский Л. А., Махутов Н.А., Бордовский А.М., Воробьев В.В. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т. 69. № 11. - 2003. - С. 40-49.
6. СНИП 2. 05.06 - 85. Магистральные нефтепроводы / Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. - 52 с.
7. Бордовский А. М., Воробьев В. В. Анализ случайного процесса нагруженности нефтепровода / Материалы II Белорусского конгресса по прикладной и теоретической механике «Механика -99», 28-30 июня 1999 г. – Минск, 1999. – С. 271-273.
8. Сосновский Л.А. Основы трибофаттики: Учебное пособие для студентов технических высших учебных заведений. Ч. I. Гомель: БелГУТ, 2003. – 246 с. Ч. II. Гомель: БелГУТ, 2003. – 235 с.
9. Воробьев В.В. Критерии поврежденности линейных участков нефтепроводов // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: Тезисы докладов IV Междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2003. – С. 22-24.
10. А. М. Бордовский. Восстановление и поддержание сопротивления усталости линейных участков нефтепровода / Тр. 4-го Международного симпозиума по Трибофатике (ISTF 4), 23–27 сентября 2002 г., Тернополь (Украина) / Отв. Ред. В.Т. Трошенко – Тернополь: ТГТУ имени Ивана Пулюя, 2002. Т. 1 – С. 410-414.
11. Оценка пригодности трубопроводов с коррозионными повреждениями. // Трубопроводный транспорт нефти. - 2000. - № 4. - С. 42-43.

УДК 621.791: 621.642.02

## ВЫСОКОПРОЧНЫЙ БАЛЛОН ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ВОДОРОДА

Чертов В. М.<sup>1)</sup>, Глезер А. М.<sup>2)</sup>, Татарников О. В.<sup>3)</sup>, Сарбаев Б. С.<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> *Донецкий инженерно-физический центр, Москва, Россия,  
chertovv@mail.ru*

<sup>2)</sup> *ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина, Москва, Россия*

<sup>3)</sup> *МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

В ряде городов Европы проходят натурные испытания автобусов фирмы Даймлер-Крайслер на твердополимерных топливных элементах. В них используется энергия водорода, запасенного в баллонах под давлением 35 МПа. При скорости порядка 80 км в час приходится менять все 6 баллонов уже через 250 км пробега [1,2]. Приведем характеристики другого устройства, шар-баллона, для хранения водорода под давлением 40 МПа. При полезном объеме 200 л запас водорода равен 5 кг, наружный диаметр шара порядка 880 мм; толщина стенок при использовании углеродного армированного углеродным волокном, переменная, от 25 до 41 мм, при двойном запасе прочности; лайнер изготовлен из алюминия; масса достигает 75 кг. Таким образом, относительная масса равна 15 кг на 1 кг водорода, т.е. массовое содержание водорода не превышает 7%. Относительная масса баллона емкостью 3 л, изготовленного по аналогичной схеме и рассчитанного на давление 30 МПа, равно 23 кг / кг H<sub>2</sub> при коэффициенте запаса прочности, равном только 1,42. Заметим, что применение таких баллонов на транспортных средствах становится экономически выгодным при массовом содержании водорода не менее 5%. Между тем увеличение давления в баллонах хотя бы до 50 МПа существенно повысит энергоемкость баллонов и пробег между заправками [3]. Такое изменение должно сопровождаться сохранением полной безопасности при эксплуатации баллонов без чрезмерного увеличения их эргономических характеристик. В России пока не созданы подобные емкости для хранения водорода. Наиболее значительное

достижение российских разработчиков – это совместная постройка РКК «Энергия», АвтоВАЗом и Уральским электрохимическим комбинатом автомобиля «Ангэл-2», снабженного батареями щелочных топливных элементов от челнока «Буран» и тремя 30-литровыми водородными баллонами под давлением 40 МПа. Без дозаправки этот автомобиль проезжает 350 км [4].

Нами разработаны конструкция и технология изготовления высокопрочного баллона для хранения и транспортирования водорода под давлением 70 МПа. Такой баллон содержит гораздо больше водорода и способствует ускоренной коммерциализации экологически чистого транспорта. Основными частями баллона являются: стальной лейнер, служащий оправкой при намотке композитной силовой оболочки и обеспечивающий герметичность емкости; силовая оболочка из углепластика; вентиль; предохранительный клапан; внутренний регулятор на давление 10 МПа.

Силовая композитная оболочка рассматривается как альтернатива металлическим баллонам высокого давления [3], обеспечивающая снижение массы бака, а также по соображениям безопасности. Процесс разрушения композитной оболочки не сопровождается взрывными эффектами, как в случае металлического баллона.

Для изготовления лейнера выбрана аустенитная нержавеющая сталь типа 10X14Г14НТ, способная в процессе низкотемпературной деформации (вытяжки) повысить прочность в 2,5 раза. Кроме того, эта сталь с пониженным содержанием хрома более пригодна для нанесения барьерного антиводородного покрытия, чем другие марки нержавеющей стали, и хорошо сваривается. [ 6,7].

При расчетах и разработке технологии изготовления лейнера использованы известные источники [8,9], но при этом внесены поправки, учитывающие предъявляемые требования и особенности технологии: увеличена толщина частей лейнера на стыках под электронно - лучевую сварку; предусмотрен прогрев в вакууме частей и самого лейнера после нанесения покрытия и после сварки узлов и всего баллона, причем по унифицированному режиму, с учетом инкубационного периода; рекомендована нестандартная технология химического никелирования [10,11]; применено трехслойное барьерное покрытие, состоящее из тонкого подслоя электрохимического никеля, толстого беспористого слоя химического никеля и тонкого слоя иммерсионного золота, с промежуточным обезводороживанием [12]. При этом учтены данные по разработке двухслойных барьерных покрытий, состоящих из плотного (беспористого) никелевого подслоя и слоя благородного металла, с особыми «антиводородными» свойствами, приведенные в работах [13,14].

Технологический процесс изготовления лейнера начинается с горячей раскатки трубной заготовки выбранной нержавеющей стали. Промежуточной операцией является закалка горячекатаной трубы - заготовки в воде с получением чисто аустенитной структуры и временного сопротивления разрыву порядка 550 МПа. После холодной раскатки получают заданные размеры трубы под последующую вытяжку. Предварительно определена та степень холодной деформации, при которой происходит двойникование - образование мартенсита. Результатом основной операции - ротационной вытяжки является получение цилиндрической части лейнера с утолщениями на стыках под сварку (см. рис.). Микроструктура стали после такой обработки - двойниковый мартенсит с повышенным до 1500 МПа уровнем прочности. Днище сферической формы, также с утолщением на торце, получается при холодной штамповке листовых заготовок. Другое - сборное - днище получается в результате штамповки двух фланцев и электронно-лучевой сварки фланцев и вентиля, с промежуточным отпуском. Оно приваривается к цилиндру, и вся сборка также отпускается для снятия чрезмерных сварочных напряжений. Учтено, что напряжения в кольцевых швах вдвое меньше напряжений, возникающих в продольных швах. Следующий этап – нанесение внутреннего барьерного покрытия на две сборки. Сначала на них наносится стандартное электрохимиче-

ское никелевое покрытие, обеспечивающее адгезию покрытия и основы. После завершения никелирования сборка и днище переносятся в вакуумную печь и прогреваются для обезводороживания. Следующая операция – нанесение на большую сборку внутреннего плотного химического никелевого покрытия из стандартного раствора, в котором дополнительно растворена специальная добавка. При соответствующем подборе состава раствора получается аморфное покрытие сплавом никель-фосфор. После окончания процесса обезводороживания повторяется. На никелевый подслои из раствора химически наносится тонкий слой иммерсионного золота с последующим прогревом. Теперь очередь сварки второго днища с основной сборкой и отпуска. Так как последний кольцевой шов, имеющий аустенитно-мартенситную структуру, не защищен барьерным покрытием, химические никелевое и золотое покрытия наносятся изнутри последовательно на участок баллона длиной порядка 200 мм от торца. При этом повторяются операции отпуска после сварки и прогрева в процессе нанесения сложного покрытия. Применением унифицированного режима отпуска-прогрева при 550-570К сохраняются высокие прочностные характеристики материала баллона и предотвращается его водородная деградация. В результате такой комбинированной обработки обеспечиваются достаточная прочность и герметичность лейнера, и он подготовлен к намотке силовой композитной оболочки.

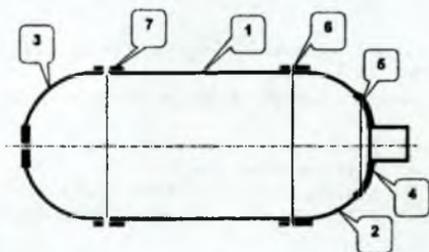


Рис. Лейнер к баллону для хранения водорода при 70 МПа. 1 – цилиндр толщиной 1 мм с буртиками толщиной 3 мм; 2 – составное днище; 3 – сферическое днище; 4 – фланец с вентилем; 5, 6, 7 – сварные швы.

Выполнен проектный расчет баллона с металлическим лейнером, изготовленным указанным способом, и силовой оболочкой из углепластика. Предположено, что металлический лейнер полностью обматывается волокнистым композитом. При этом использована известная методика [15]: баллон рассматривается как многослойная безмоментная оболочка, изготовленная намоткой волокнистого композита, свойства которого описываются нитяной моделью. Заданы следующие характеристики баллона и применяемых материалов:

- радиус цилиндрической части 150 мм,
- длина цилиндрической части 810 мм,
- радиус полюсного отверстия 15 мм,
- толщина металлического лейнера, в среднем, 1,5 мм,
- предел прочности монослоя из углепластика при растяжении вдоль волокон 1200 МПа,
- плотность углепластика  $1500 \text{ кг/м}^3$ ,
- предел прочности материала лейнера 1500 МПа,
- плотность материала лейнера  $7800 \text{ кг/м}^3$ ,
- эксплуатационное давление 70 МПа
- коэффициент запаса прочности 2,6.

Геометрическая форма днища, углы намотки и ее толщина на цилиндрической части и на днище, структура пакета многослойного композита на цилиндрической части рассчитываются из условия равнопрочности. При этом масса конструкции будет

минимальной. Отметим, что для такой конструкции форма дна отличается от сферической.

В результате расчета получены следующие параметры баллона:

- суммарная толщина цилиндрической части, включающая толщину лейнера, спиральных и кольцевых слоев, равна 0,032 м,
- суммарная масса силовой оболочки 43,6 кг,
- масса металлического лейнера 8,8 кг,
- масса баллона, без учета массы штуцера и запорно-предохранительной арматуры, 52 кг,
- полная длина баллона 1,03 м,
- ориентировочная масса заправленного водорода при нормальных условиях 4,4 кг.
- массовое отношение, кг массы на кг водорода, 12.
- массовое содержание водорода 8 %

Таким образом, в результате подбора соответствующей силовой оболочки и стального лейнера и технологии их изготовления, обеспечиваются вполне приемлемые характеристики высокопрочного баллона для хранения и транспортирования водорода при давлении порядка 70 МПа, не уступающие характеристикам баллонов, разработанных канадской фирмой Квантум [5].

### Список литературы

1. Д. Дж.Холт. Транспортные средства на топливных элементах // Copyright 2001 SAE International ISBN 0-7680-0836-0. Пер. с англ. С.40.
2. Т.Т.Гертиг О некоторых актуальных тенденциях... // Альтернативная энергетика и экология. 2004.1. 32-35.
3. А.С.Коротеев, В.В.Миронов, В.А.Смоляров. Перспективы использования водорода в транспортных средствах // Альтернативная энергетика и экология.2004.1.5-13
4. В.В.Воронцов, В.А.Никитин, Б.А.Соколов, С.А.Худяков. Энергетические установки с топливными элементами для транспортных средств // Тр. 4-й Межд. конф. «Водородная обработка материалов» Донецк.: ДонНТУ. 2004. С.19-24.
5. Емкость для хранения водорода // Вестник водородной экономики и экологии. 2004.1.43
6. Уваров А.И., Терещенко Н.А. Деформационное двойникование- эффективный механизм упрочнения аустенитных сталей // Тез. докл. XVII Уральской школы металловедов- термистов. Киров.: ВятГУ. 2004. С.53-54.
7. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы. Справ. изд./ А.П.Шлямнев и др. М.: Интермет Инжиниринг. 2000. С.59-61.
8. В.И.Трегубов. Перспективные технологии изготовления цилиндрических изделий ротационной вытяжкой // Заготовительные производства в машиностроении.2004.2.25-27.
9. Бровман М.Я., Пауленков К.Ф. Конструктивные особенности сварных металлических баллонов // Технология машиностроения.2004.3.27-30.
10. Белоглазов В.И., Карелин А.В. Продление работоспособности раствора химического никелирования // Мат. сем. «Гальваника и обработка поверхности».М.:РХТУ. 2000.С.45
11. Скопинцев Д.В., Дмитриевский А.Л., Клинский Г.Л. Высокопроизводительный процесс химического никелирования // Тез. докл. Межд. конф. «Электрохимия, гальванотехника и обработка поверхности». М.: РХТУ.2001. С.104.
12. Чертов В.М. Покрытия драгоценными металлами для частей водородного тракта электромобиля // Сб. тез. II Межд. симп. «Безопасность и экономика водородного транспорта». Саров.: НТЦ «ТАТА».2003.С.55.
13. В.И.Ткачев, В.И.Холодный, И.Н.Левина. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. Львов.: Вертикаль. 1999. С 194-205.
14. О.Н.Железняк, Б.М.Громыко, В.М.Зайцев. Структурные изменения в гранулированном жаропрочном сплаве ЭП741НП под воздействием водорода // МитОМ. 2003. 6. 23-25.
15. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. – М.: Машиностроение. – 1977. – 144 с.