

ЦИКЛИЧЕСКИЕ РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ МАКЕТОВ ТРУБЧАТОГО ЭЛЕМЕНТА

А. В. Вертей, С. К. Гришечкин, И. Л. Малков, С. В. Фильчагин, А. А. Юхимчук

РФЯЦ – Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
607188, г. Саров, Нижегородская обл., Россия

В докладе приведено описание стенда для проведения циклических испытаний, представлены результаты циклических ресурсных испытаний прочностных макетов трубчатого элемента (ТЭ). В результате проведения испытаний показано, что материал корпусов ТЭ работает в упругой области и способен выдержать 1000 циклов сорбции/десорбции в процессе эксплуатации бака.

Введение

Работа проводилась в рамках проекта #3655. Целью проекта являлась разработка металлгидридного водородного бака для автотранспортных средств [1–3]. В процессе выполнения проекта решалось большое количество задач связанных с выбором конструкции бака [4–6], подбор металлгидрида для топливного бака, создание стендов и установок для проведения испытаний на образцах водородного топливного бака [7–9]. Одной из задач, стоявшей перед разработчиками бака, была задача подтверждения его работоспособности в течение 1000 циклов сорбции/десорбции водорода в условиях циклических температурных нагружений. Если учесть, что одна заправка создаваемого бака (цикл сорбции/десорбции) была рассчитана на 500 км движения автомобиля, оснащенного таким баком, то 1000 циклов гарантировали пробег автомобиля 500 тыс. км. Для подтверждения ресурса ТЭ в условиях термоциклирования нами был создан стенд и проведены циклические ресурсные испытания ТЭ, изготовленных из трех конструкционных материалов – нержавеющей стали 12Х18Н10Т, малолегированной стали 37Г2С и алюминиевого сплава 6061.

Стенд для циклических ресурсных испытаний прочностных макетов ТЭ

Принципиальная газовая схема стенда приведена на рис. 1. Входящая в состав стенда климатическая камера обеспечивает поддержание температур в диапазоне от -40 до $+60$ °С с точностью $\pm 1,2$ °С в течение длительного времени. Для автоматизации испытаний и сведения к минимуму потерь водорода, его компримирование до давления 350 бар производится поочередно при помощи двух металлгидридных источников водорода высокого давления на основе ванадия [10]. Данный метод аналогичен, примененному ранее для ресурсных испытаний клапанов высокого давления [11].

Управление стендом осуществляется в автоматизированном режиме с помощью автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ) и использованием пакета CRW32 [12]. Интерфейс АСКУ в среде CRW32 представлен на рис. 1.

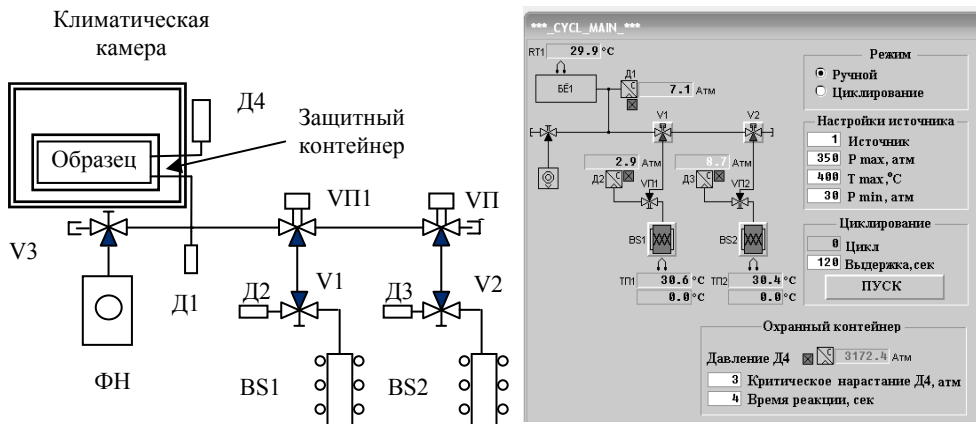


Рис. 1. Принципиальная схема стенда для циклических ресурсных испытаний прочностных макетов ТЭ: V1–V3 – вентили ручные; D1–D4 – датчики давления; VP1, VP2 – вентили с пневмоприводом; ФН – форвакуумный насос, BS1, BS2 – металлгидридные ванадиевые источники водорода. Интерфейс АСКУ стенда для циклических испытаний прочностных макетов ТЭ в программе CRW32

Работа на стенде осуществлялась следующим образом. Образец помещался в защитный контейнер, предназначенный для локализации водорода и защиты от возможного разлета осколков в случае разрушения испытываемого образца в процессе циклирования. Внутренняя полость защитного контейнера заполнялась гелием под давлением 5–6 бар, для обеспечения хорошей передачи температуры, поддерживаемой климатической камерой, к образцу. Давление во внутренней полости защитной камеры контролировалось в процессе испытаний датчиком Д4 (см. рис. 1), что позволяло заметить утечки из испытываемого образца в случае незначительной его разгерметизации. Затем защитная камера с образцом помещалась в климатическую камеру. Перед началом испытаний образец вакуумировался с помощью безмаслянного форвакуумного насоса до остаточного давления 10^{-2} мбар.

В исходном состоянии один из ванадиевых источников (например, BS1, см. рис. 1) насыщен водородом до предельного состояния. Другой (в данном случае, BS2) насыщен настолько, чтобы обеспечить полное поглощение водорода, выделяемого первым источником, нагретым до температуры 400 °С и обеспечивающим подачу в образец водорода под давлением 350 бар.

Источник BS1 нагревался до температуры, при которой реализуется давление 350 бар. В ходе дальнейшего эксперимента это давление поддерживалось за счет повышения температуры источника. После выдержки образца при заданном давлении 350 бар в течение 5 мин, газ из образца поступал в источник BS2, где он поглощался ванадием. После падения давления в образце до заданной величины (см. рис. 1), цикл нагружения образца повторялся.

В момент, когда источник BS1 был уже не способен создать давление 350 бар при температуре 400 °С в течение 15 мин автоматически происходило отключение его нагревателя. Источник охлаждался до температуры ~ 50 °С. В этот момент автоматически происходила смена функций источников BS1 и BS2, т. е. источник BS2 начинал выделять газ, а источник BS1 его поглощать и процесс циклирования продолжался.

Таким образом, в автоматическом режиме стенд позволял производить набор необходимого количества циклов нагружения образца.

Циклические ресурсные испытания прочностных макетов ТЭ и результаты испытаний

Проведены циклические ресурсные испытания прочностных макетов, имитирующих геометрию корпуса ТЭ наружным диаметром ≈ 60 мм и изготовленных из различных КМ: нержавеющей стали 12Х18Н10Т, малолегированной стали 37Г2С и алюминиевого сплава 6061. Алгоритм испытаний приведен выше. Планировалось, что общее число циклов нагружения каждого макета должно составить не менее 1000.

Макет из стали 12Х18Н10Т

Конструкция макета из стали 12Х18Н10Т приведена на рис. 2. Сварные соединения крышек с обечайкой выполнены ручной аргонодуговой сваркой. Последовательность изменения температуры макета T от числа циклов N показана на рис. 3.

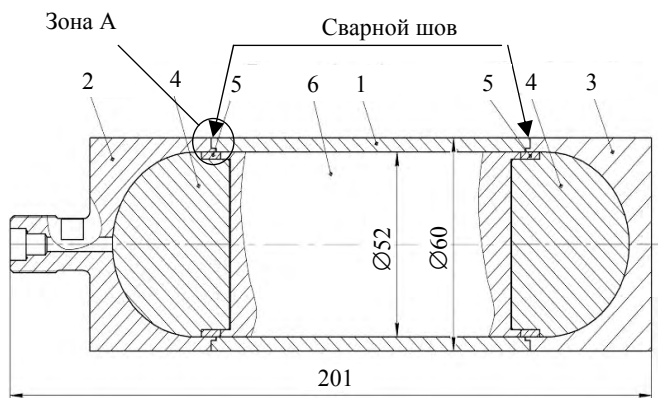


Рис. 2. Конструкция прочностного макета из стали 12Х18Н10Т: 1 – обечайка; 2, 3 – крышка; 4, 6 – вкладыш; 5 кольцо

На 536-м цикле нагружения при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 320 бар произошла разгерметизация макета по сварному шву крышки и обечайки (рис. 4, зона А). Металлографический анализ показал, что причиной образования сквозной трещины является неполный провар сварного соединения – толщина сварного шва крышки в локальной зоне составляла $0,7\text{ мм}$ при требуемой $\approx 4\text{ мм}$, рис. 4. Но даже при таком серьезном дефекте сварного соединения прочностной макет выдержал более 500 циклов нагружения, что говорит о том, что сталь 12Х18Н10Т является перспективным КМ для корпуса ТЭ.

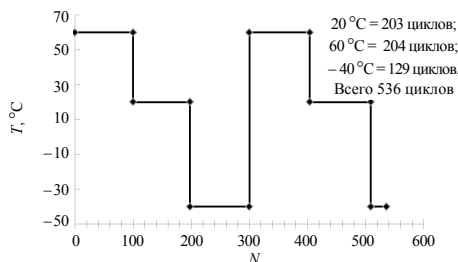


Рис. 3. Последовательность изменения температуры прочностного макета из нержавеющей стали 12Х18Н10Т при ресурсных испытаниях

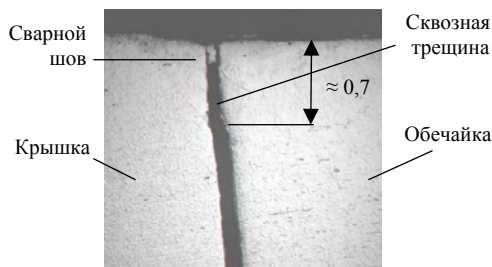


Рис. 4. Микроструктура сварного соединения макета из нержавеющей стали 12Х18Н10Т в месте разрушения (зона А, рис. 2)

Макет из алюминиевого сплава 6061

Ввиду ограниченной свариваемости сплава 6061 герметизация макета осуществлялась с использованием принципа «самоуплотнения». Конструкция макета приведена на рис. 5, изменение температуры макета T от числа циклов N приведено на рис. 6.

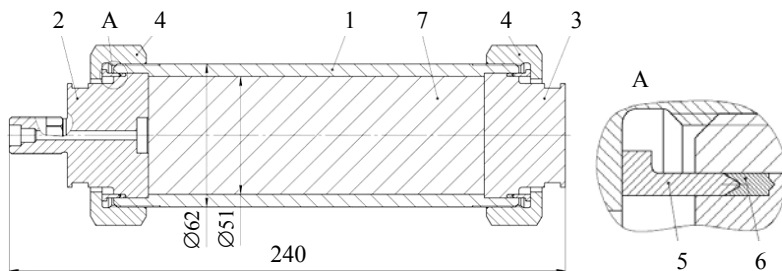


Рис. 5. Конструкция прочностного макета из алюминиевого сплава 6061: 1 – обечайка; 2, 3 – крышка; 4 – гайка; 5 – кольцо; 6 – прокладка; 7 – вкладыш

Макет из алюминиевого сплава 6061 выдержал 1002 цикла нагружения без разгерметизации. После этого при комнатной температуре при нагружении давлением водорода была определена его несущая способность. Давление разрушения макета составило $P_{\text{разр}} = 910\text{ бар}$; разрушение произошло по образующей обечайки (рис. 7).

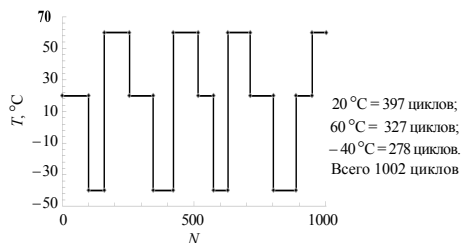


Рис. 6. Последовательность изменения температуры прочностного макета из алюминиевого сплава 6061 при ресурсных испытаниях

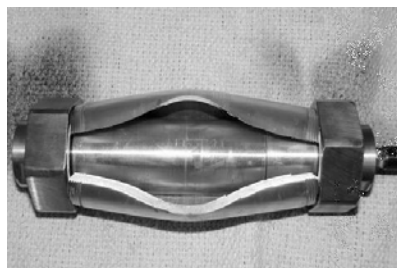


Рис. 7. Характер разрушения прочностного макета из алюминиевого сплава 6061

Макет из стали 37Г2С

В виду технологических трудностей, связанных с необходимостью проведения высокотемпературного отжига после сварки ТЭ, изготовленного из данной стали, циклированию подвергались два возможных варианта уплотнения ТЭ – сварной и выполненный по принципу «самоуплотнения». Вследствие этого макет для циклических испытаний представлял собой цилиндрическую обечайку, соединенную в центре электроннолучевой сваркой (рис. 8), а по торцам герметизированную по принципу «самоуплотнения». Последовательность изменения температуры макета ТЭ от числа циклов N в ходе испытаний приведена на рис. 9.

Макет из стали 37Г2С выдержал 1000 циклов нагружения без разгерметизации. После этого при комнатной температуре при нагружении давлением водорода была определена его несущая способность. Давление разрушения макета составило 790 бар; разрушение произошло по сварному шву обечайки (рис. 10). Металлографический анализ показал, что такой характер разрушения обечайки обусловлен непроваром сварного соединения – глубина сварного шва фактически составила ≈ 2 мм при требуемой ≈ 3 мм.

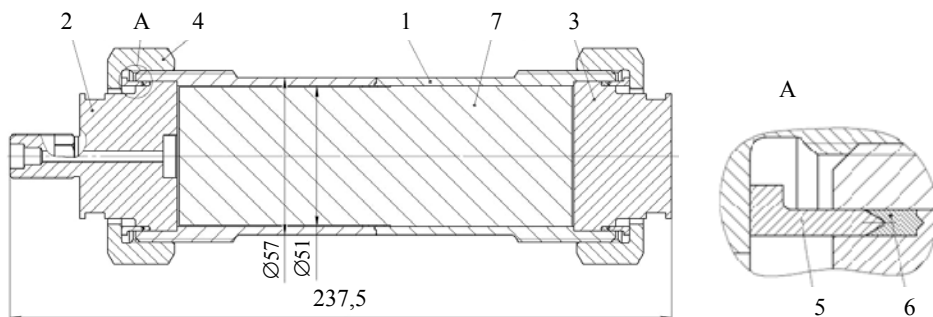


Рис. 8. Конструкция прочностного макета из стали 37Г2С: 1 – обечайка; 2, 3 – крышка; 4 – гайка; 5 кольцо; 6 – прокладка; 7 – вкладыш

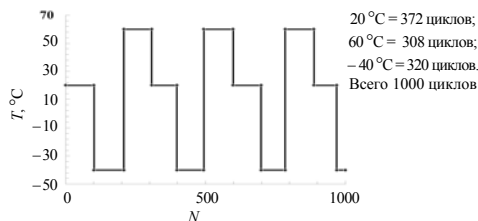


Рис. 9. Последовательность изменения температуры прочностного макета из стали 37Г2С при ресурсных испытаниях

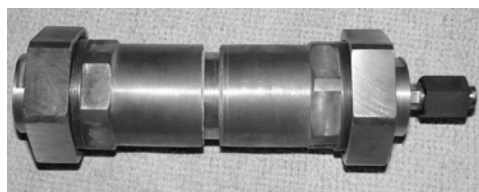


Рис. 10. Характер разрушения прочностного макета из стали 37Г2С

Расчетно-экспериментальная оценка НДС и несущей способности прочностных макетов

Расчетные оценки НДС при максимальном давлении циклирования (350 бар) и несущей способности прочностных макетов из сталей 12Х18Н10Т, 37Г2С и алюминиевого сплава 6061 приведены в таблице. При расчете на прочность макетов были взяты фактические значения характеристик механических свойств КМ.

Результаты расчета НДС макетов при действии внутреннего давления 350 бар показывают, что при циклических ресурсных испытаниях напряжения в обечайке макетов из всех КМ меньше $\sigma_{0,2}$, то есть обечайки работают в упругой области. В таких же условиях работает и корпус ТЭ.

Расчетное давление разрушения макета с обечайкой из алюминиевого сплава 6061 удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами испытаний прочностных макетов на несущую способность давлением водорода. Различие расчетных и экспериментальных давлений разрушений макетов со сварными обечайками из сталей 12Х18Н10Т и 37Г2С объясняется наличием дефекта в сварных соединениях обечайки (недостаточной глубиной сварного шва). Это указывает на необходимость тщательной отработки технологии сварки и проведения 100 % контроля качества сварного соединения при изготовлении ТЭ.

Результаты расчета НДС и несущей способности прочностных макетов

Материал обечайки макета	$\varnothing_{нар}/\varnothing_{вн}^1$, мм	$P = 350$ бар			Несущая способность				
		$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{экв}$	n_T^2	расчетная			эксперимент	
					$P_{разр}$, бар	σ_B	$\sigma_{экв}$		$n_{нес}^3$
МПа		МПа							
Сталь 12Х18Н10Т	60/52	310	230	1,3	580	560	570	1,7	320 ⁴
Алюминиевый сплав 6061	62/51	350	200	1,8	770	380	380	2,2	910

Окончание таблицы

Материал обечайки макета	$\varnothing_{\text{нар}}/\varnothing_{\text{вн}}^1$, мм	$P = 350$ бар			Несущая способность				
		$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{экв}}$	n_T^2	расчетная				эксперимент
		МПа			$P_{\text{разр}}$, бар	σ_B	$\sigma_{\text{экв}}$	$n_{\text{нес}}^3$	
						МПа			$P_{\text{разр}}$, бар
Сталь 37Г2С	57/51	600	280	2,1	1000	750	750	2,9	790

Примечание. ¹ $\varnothing_{\text{нар}}$, $\varnothing_{\text{вн}}$ – наружный и внутренний диаметры обечайки; ² $n_T = \sigma_{0,2}/\sigma_{\text{экв}}$ – коэффициент запаса прочности по пределу текучести; ³ $n_{\text{нес}} = P_{\text{разр}}/P$ – коэффициент запаса прочности по несущей способности; ⁴разрушение макета при циклировании в результате дефекта сварного соединения.

Выводы

1. Создан экспериментальный стенд для проведения циклических ресурсных испытаний прочностных макетов ТЭ. Использование в составе стенда двух термодесорбционных металлгидридных источников водорода на основе ванадия позволяет проводить испытания в автоматизированном режиме при давлении до 350 бар в диапазоне температур от -40 до $+60$ °С.

2. Проведенные расчеты и циклические ресурсные испытания прочностных макетов ТЭ из различных КМ показали, что материал корпусов ТЭ работает в упругой области и при обеспечении качества сварных соединений ТЭ способен безаварийно выдержать 1000 циклов сорбции/десорбции в процессе эксплуатации бака на автомобиле.

Список литературы

1. Балуев В. В., Попов В. В., Гришечкин С. К., Юхимчук А. А. Разработка металлгидридного бака для автотранспортных средств // Сб. докл. Пятой международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами, IHISM-09 Junior». Саров, 06–10 июля 2009 г. С. 181–191.

2. Юхимчук А. А., Балуев В. В., Попов В. В. и др. Разработка металлгидридного бака для автотранспортных средств // Сб. докл. Четвертой международной конференции и Шестой международной Школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами, IHISM-10». Воронеж, 04–10 июля 2010 г. С. 82–86.

3. Юхимчук А. А., Балуев В. В., Попов В. В. и др. Разработка металлгидридного бака для автотранспортных средств // Экологический Вестник России. 2010. № 10. С. 52.

4. Юхимчук А. А., Попов В. В., Балувев В. В. и др. Устройство для хранения и подачи газообразного топлива / Патент РФ № 75708. Опубликовано 20.08.2008. Бюл. № 23.

5. Юхимчук А. А., Попов В. В., Балувев В. В., Гришечкин С. К. Устройство для хранения и подачи газообразного топлива / Патент РФ № 91405. Опубликовано 10.02.2010. Бюл. № 4.

6. Гаин П. В., Гаин И. П., Юхимчук А. А., Jorgensen S. Топливный бак и установка для хранения и подачи газа / Патент РФ № 2382268С2. Опубликовано 20.02.10. Бюл. № 5.

7. Попов В. В. Моделирование физико-химических процессов в металлгидридном топливном баке // Сб. докл. Четвертой международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. HISM-08». Н. Новгород, 2008. С. 97–105.

8. Кирдяшкин А. А., Баурин А. Ю., Юхимчук А. А. Установка для изучения кинетики поглощения водорода металлами и сплавами // Сб. докл. Четвертой международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. HISM-08». Н. Новгород, 2008. С. 316–319.

9. Баурин А. Ю., Балувев В. В., Попов В.В., Юхимчук А. А. Экспериментальные исследования кинетики сорбции и десорбции водорода при давлениях до 35 МПа трубчатым элементом металлгидридного топливного бака // Сб. тезисов докладов Пятой международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами, HISM-09 Junior». Саров, 06–10 июля 2009 г. С. 133–134.

10. Голубков А. Н., Кононенко А. А., Юхимчук А. А. Термодесорбционные источники изотопов водорода на основе гидрида ванадия // Изотопы водорода. Фундаментальные и прикладные исследования: Сб. статей. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2009. С. 516–526.

11. Юхимчук А. А., Балувев В. В. Установки высокого давления для работы с водородом и его изотопами // Сб. докл. Четвертой международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. HISM-08». Н. Новгород, 2008. С. 307–315.

12. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW DAQ) // Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612848 от 10.08.2006 г.