

УДК 536.12

Применение барорезисторов из моносulfида самария при проведении теплофизических экспериментов

Канд. техн. наук К. Н. БОЛЬШЕВ¹, канд. техн. наук В. А. ИВАНОВ²,
А. А. СТЕПАНОВ³

¹k.bolshev@mail.ru, ²v.ivanov49@mail.ru, ³stepanov-a.a@mail.ru

Институт Физико-Технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
677891, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1

В. В. КАМИНСКИЙ

Vladimir.Kaminski@mail.ioffe.ru

Физико-Технический Институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Барорезисторы — полупроводниковые датчики локального давления на основе моносulfида самария. Принцип действия датчика основан на зависимости электросопротивления рабочего слоя от давления и температуры, что позволяет вычислить давление, зная температуру датчика. Существенное преимущество данных датчиков состоит в том, что их можно размещать внутри исследуемого объекта, измеряя давления в различных областях. Рассматривается применение данных датчиков при низкотемпературных натурных испытаниях сосудов высокого давления. Для нагружения сосудов использовалась методика, использующая внутреннее давление замерзающей воды. Приведены экспериментальные данные, которые позволили наблюдать процессы, происходившие внутри замкнутого объема сосуда высокого давления по мере образования льда и роста давления. Также рассматривается влияние электрического потенциала на пластичность сосуда в аналогичных условиях. Был проведен эксперимент по применению данных датчиков для измерения давления при одномерном промерзании во влажном грунте. Приведены результаты для двух датчиков располагающихся на разной глубине.

Ключевые слова: барорезистор, датчик давления, образование льда, промерзание грунта.

Application of barorezistor from samarium monosulfide when carrying out heatphysical experiments

Ph. D. K. N. BOLSHEV¹, Ph. D. V. A. IVANOV², A. A. STEPANOV³

¹k.bolshev@mail.ru, ²v.ivanov49@mail.ru, ³stepanov-a.a@mail.ru

Institute of Physics and technology problems of the North of V. P. Larionov SB RAS
677891, Russia, Yakutsk, Oktyabrskaya St., 1

V. V. KAMINSKY

Vladimir.Kaminski@mail.ioffe.ru

Ioffe Physical Technical Institute

26 Polytekhnikeskaya, St Petersburg 194021, Russian Federation

The baroresistors are semiconductive sensors of local pressure based on samarium monosulfide. These sensors have dependence of the resistance on pressure and temperature, which allows us to calculate the pressure affecting the sensor if its temperature is known. The significant advantage of such sensors is their small size, they can be located in observed object measuring pressure in different areas. Implementation of these sensors at full scale tests of high pressure vessels is described. A method using inner pressure of freezing water is used to load these vessels. The experimental data showing processes which took place in closed volume of the vessel during ice formation and pressure increase are given. Influence of the electric potential affecting the vessel at the same conditions is considered. An experiment using the sensors to measure pressure at one-dimensional freezing in moist ground was conducted. The data on two sensors located at different depths are given.

Keywords: baroresistor, pressure sensor, ice formation, ground freezing.

Несмотря на большое количество существующих методов, устройств, приборов, автоматизированных комплексов, постоянно возникают новые проблемы, решение которых не всегда возможно имеющимися средствами. Особенно это актуально для решения задач, связанных со спецификой Крайнего Севера. Настоящая работа пос-

вящена проблеме измерения давления в условиях замерзания во влажных дисперсных материалах.

Барорезисторы — полупроводниковые датчики локального давления на основе моносulfида самария (SmS) являются совместной разработкой ФТИ им. А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург) и ИФТПС СО РАН (г. Якутск). Датчик

представляет собой тонкую поликристаллическую пленку SmS, нанесенную на стеклянную подложку, с напыленными на нее металлическими контактными площадками с припаянными к ним токовыводами. Принцип действия датчика основан на зависимости электросопротивления рабочего слоя от давления и температуры, что позволяет вычислить давление, зная температуру датчика. При этом зависимость логарифма сопротивления от температуры и давления имеет линейный характер. Эта линейность значительно упрощает вычисление давления и повышает надежность результата [1–3].

Существенное преимущество данных датчиков состоит в том, что их можно размещать внутри исследуемого объекта, измеряя давления в различных областях.

Моносulfид самария обладает самой высокой чувствительностью к деформации (тензочувствительностью) среди известных материалов. Применение SmS позволит создать новый класс измерительных приборов (датчики давления силы, момента, ускорений и т. п.), обладающих высоким выходным сигналом и минимальной погрешностью [1, 4].

Основной элемент барорезистора — тонкая (~0,5 мкм) прямоугольная полупроводниковая пленка, состоящая из поликристаллического SmS, нанесенная на стеклянную подложку. Размеры датчиков 0,5–2 мм.

Для измерения давления с помощью барорезисторов на основе SmS предварительно определяются температурный коэффициент сопротивления (ТКС):

$$\alpha = \frac{\partial \ln R}{\partial T},$$

где R — сопротивление, Ом; T — температура, °С.

Барический коэффициент сопротивления (БКС):

$$\beta = \frac{\partial \ln R}{\partial P},$$

где P — давление всестороннего сжатия, Па.

Характерные, для описываемых барорезисторов, значения $\alpha \sim 1,5 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$ и $\beta \sim 2 \cdot 10^{-3}$ МПа $^{-1}$.

Для определения ТКС датчиков использовался криостат КРИО-ВТ-05–01 с рабочим платиновым образцовым термометром 1 разряда ТСПН-5, БКС определялся в камере высокого давления со сжатым воздухом или газом.

Изменение давления в процессе эксперимента вычислялось по формуле

$$\Delta P = \frac{\ln R - \ln R_0 - \alpha(T - T_0)}{\beta}$$

где R_0 , T_0 — сопротивление и температура в начальный момент эксперимента соответственно.

Первоначально датчики использовались при реализации установок на базе двух измерительных систем: компьютерно-измерительной системы (КИС) «АКСАМИТ 6.25», информационно-измерительной системы (ИИС) «СИИТ 2», и персонального компьютера для испытаний прочности сосудов высокого давления [4] (рис. 1).

ИИС «СИИТ 2» была модернизирована для соединения с персональным компьютером IBM PC посредством платы сопряжения ЛА-32Д на интерфейсе ISA. КИС «АКСАМИТ 6.25» соединяется с персональным компьютером по стандартному интерфейсу RS-232.

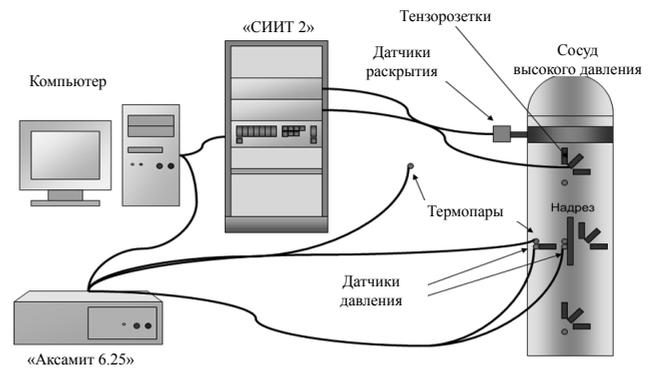


Рис. 1 Схема установки для испытания сосудов высокого давления

В качестве объектов испытаний использовались цилиндрические сосуды высокого давления диаметром 219 мм, длиной 1370 мм и толщиной стенок 8 мм, изготовленные из нормализованной стали 45, с искусственно нанесенными поверхностными концентраторами напряжений. На поверхность сосуда наносили искусственный дефект в виде продольного надреза глубиной 2 мм и шириной 2 мм в центральной части; длины надрезов изменяли — они составляли (без учета выхода фрез) 50, 60, 70 и 90 мм. Температура наружной среды колебалась от –15 до –20 °С.

На поверхности сосудов в верхней, средней и нижней части устанавливались тензодатчики в виде тензорозеток для измерения деформаций в трех направлениях и термодпары для измерения температуры на поверхности сосуда. Датчики раскрытия для измерения пластической деформации размещали в верхней и нижней частях сосуда. Внутри сосуда с помощью металлической крестовины со складывающейся поперечной частью устанавливали датчики давления вместе с термодпарами. Их располагали в середине сосуда в верхней, средней, нижней частях и у стенки сосуда. Все датчики тщательно изолировали и герметизировали во избежание контакта с водой. Схема эксперимента позволяла регистрировать данные в режиме реального времени.

Нагружение сосуда внутренним давлением осуществлялось в результате расширения замерзающей воды: наполненный жидкостью и герметизированный сосуд давления постепенно охлаждался до отрицательной температуры. При достижении критического значения внутреннего гидростатического давления сосуд разрушался в результате инициации трещины от искусственного дефекта. Такая схема нагружения является жесткой, без релаксации напряженно-деформированного состояния стенки сосуда [5–7].

Комплекс производит измерение и регистрацию внутренней и внешней температур сосуда, давления внутри сосуда и деформации его стенок в режиме реального времени. В качестве датчиков температуры используются термодпары, датчики давления представляют собой барорезисторы на основе моносulfида самария. Для измерения упругих деформаций используются тензодатчики, представляющие собой приклеиваемые тензорезисторы КФ-5 с сопротивлением 100 Ом и базой 5 мм. Измерение пластических деформаций осуществляется с помощью датчиков перемещения, смонтированных по мостовой

схеме из тензодатчиков сопротивлением 400 Ом. Регистрация данных термопар и датчиков давления проводится с помощью КИС «Аксамит 6.25», а датчиков перемещения и тензодатчиков с помощью ИИС «СИИТ 2».

Для автоматической регистрации данных в процессе эксперимента написана программа на языке Turbo Pascal 7.1. Обработки и анализ полученных данных производился программой написанной на языке Delphi 7 в среде Windows.

Полученные экспериментальные данные позволили впервые наблюдать интересные процессы, происходившие внутри замкнутого объема сосуда высокого давления, по мере образования льда и роста давления. Давление внутри сосуда растет не монотонно, а время от времени сбрасывается (рис. 2, б). Это объясняется тем, что образующийся в сосуде слой льда по мере намораживания на стенках сосуда периодически разрушается под действием давления оболочки сосуда, пре-

вращаясь в ледяную шугу. Этот периодический процесс продолжается до тех пор, пока толщина ледяного слоя не становится достаточной для разрыва оболочки. Также видно, что сбросы давления сопровождаются скачками температуры внутри объема и на поверхности сосуда (рис. 2, а), т. е. при сбросе давления происходит выделение теплоты [7–9].

Сбросы давления также видны, хотя и менее выразительно, на графиках раскрытия и деформации сосуда (рис. 3), что подтверждает правильность полученных с помощью барорезисторов данных.

Дальнейшее применение барорезисторы получили при создании автоматизированной установки для измерения температуры и криогенного давления при одномерном промерзании во влажном дисперсном материале (рис. 4).

Установка состоит из персонального компьютера, прецизионного преобразователя сигналов термометров сопротивления и термопар «ТЕРКОН», измерительной

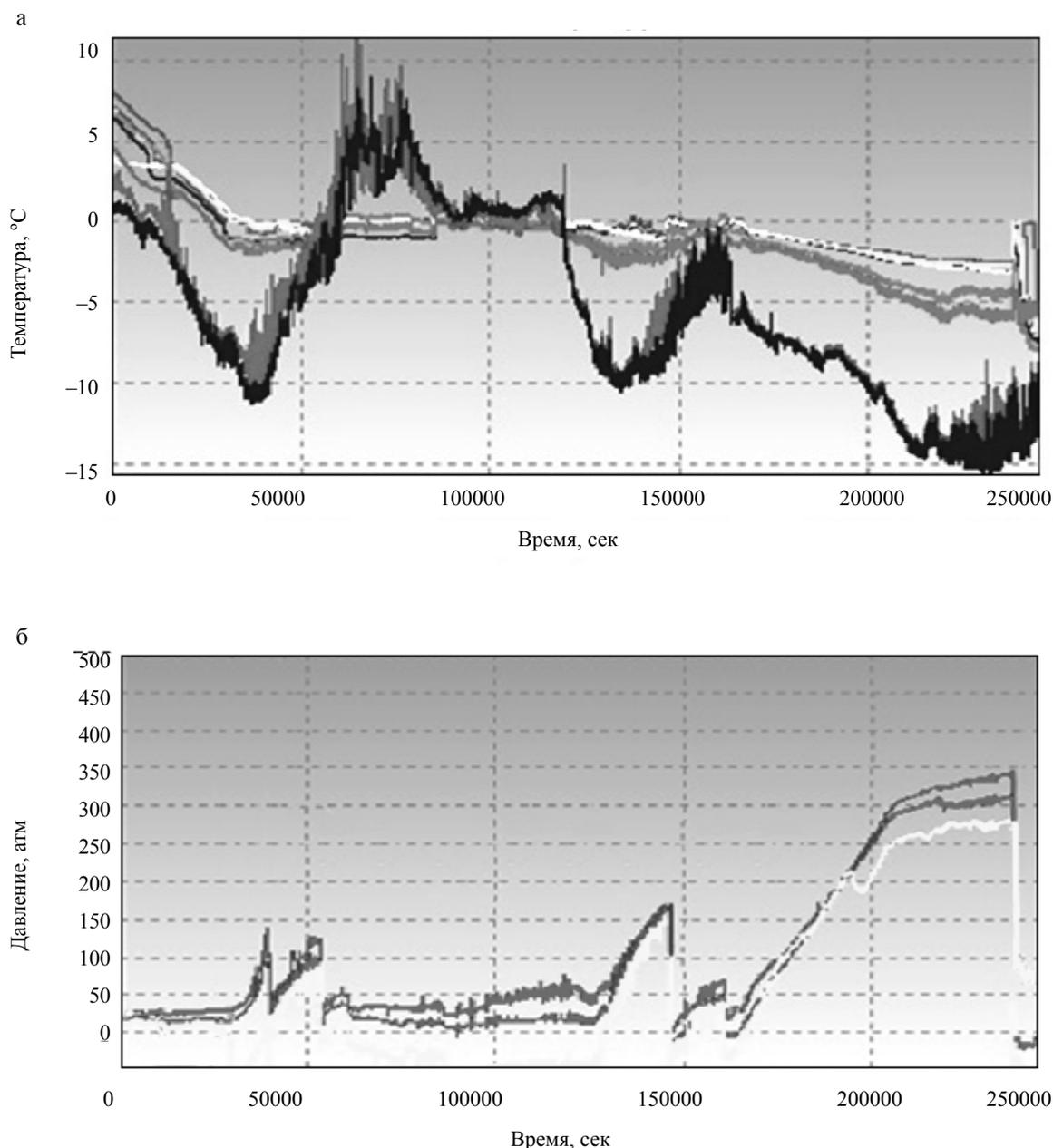


Рис. 2. Графики зависимостей температуры (а) и давления (б) в замкнутом сосуде с водой от времени замораживания

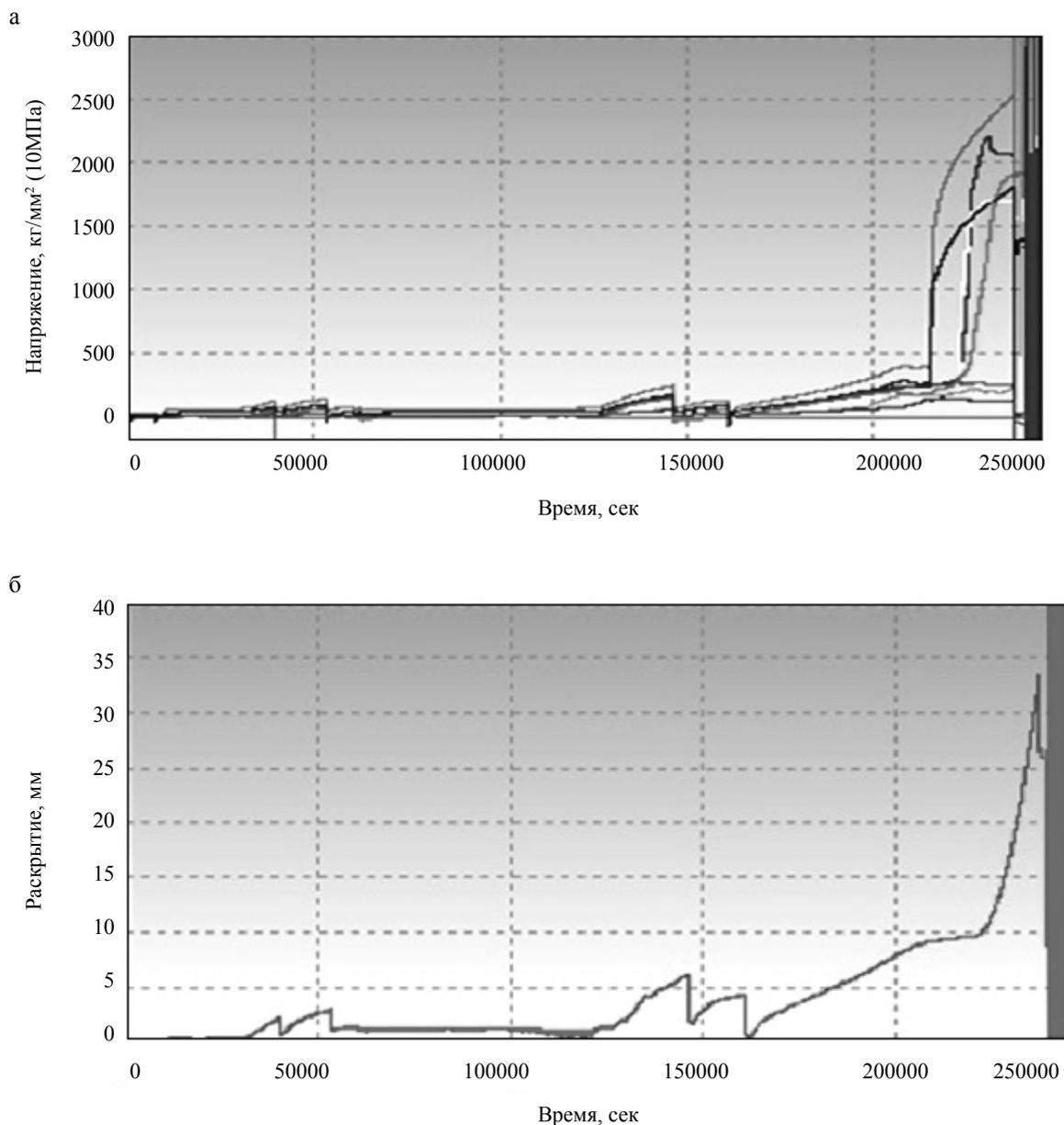


Рис. 3. Графики зависимостей деформации (а) и раскрытия (б) от времени замораживания



Рис. 4. Схема установки для измерения температуры и криогенного давления при одномерном промерзании во влажном дисперсном материале

ячейки с расположенными в ней датчиками давления и термопарами и блока опорных спаев (БОС) термопар.

Измерительная ячейка представляет собой цилиндр высотой 15 см. и внутренним диаметром 5 см, в который помещаются термопары и датчики давления (рис. 5).

Причем термопара и датчик давления располагаются максимально близко друг к другу. Это позволяет рассчитать давление, действующее на датчик, зная его температуру, которая контролируется при помощи термопары. В качестве испытываемой среды использовался увлажненный речной песок.

В начале эксперимента в ячейку с предварительно отградуированными датчиками давления и термопарами засыпался увлажненный речной песок комнатной температуры, затем ячейка теплоизолировалась со всех сторон кроме верхней части и помещалась в морозильную камеру. В ходе эксперимента данные с датчиков снимались преобразователем «ТЕРКОН» и передавались на персональный



Рис. 5. Измерительная ячейка

компьютер. Давление, зарегистрированное на датчиках в начальный момент времени, принималось равным нулю. Программа записывала данные об изменении сопротивления барорезисторов и температуры на термопарах. Эксперимент заканчивался в момент, когда температура достигала нижней точки и оставалась постоянной.

Пример результата эксперимента для двух датчиков давления представлен на рис. 6. Барорезистор 1 был расположен в верхней части измерительной ячейки. Барорезистор 2 находился в ячейке ниже. На графике рис. 6, а показаны температуры, зарегистрированные на термопарах соответствующих барорезисторам 1 и 2. На графике рис. 6, б приведены зависимости давления от времени, рассчитанные для соответствующих барорезисторов. Общая продолжительность эксперимента составила около 22 ч. Не вдаваясь в детали физики замерзания данного типа грунта, можно сказать, что основные особенности процесса отражены верно [9, 10]. Имеются в виду особенности кривой при замерзании воды в районе 0 °С и нестабильное поведение давления в температурной области между точкой замерзания воды и связанной воды от 0 до -20 °С. Это позволяет полагать, что и при таких малых давлениях (~1 МПа) барорезисторы на основе SmS отражают изменение давления адекватно.

Ранее барорезисторы использовались для регистрации больших давлений, возникающих при испытании со-

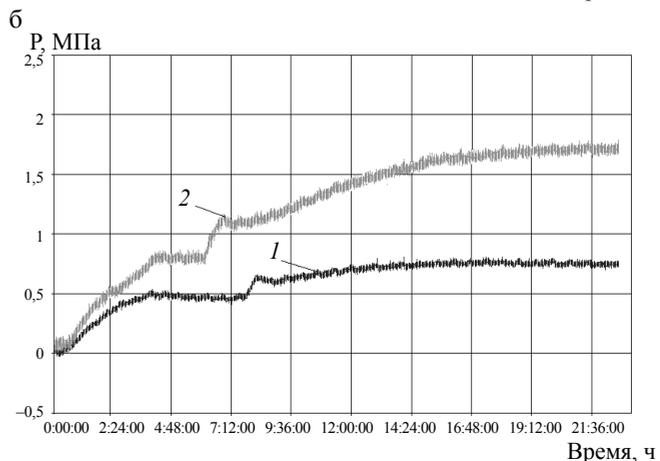
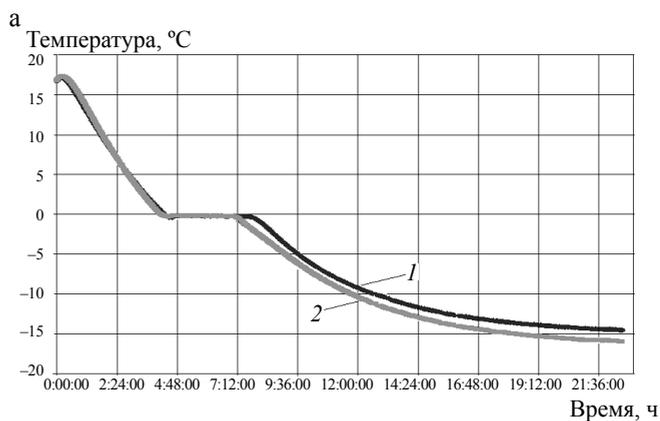


Рис. 6. Зависимости температуры (а) и давления (б) от времени при промерзании грунта

судов и труб на прочность. Данный эксперимент показывает, что при соответствующей градуировке барорезисторы на основе SmS могут применяться для регистрации небольших давлений возникающих в мерзлом грунте.

В 2012 г. была произведена модернизация установки для испытания сосудов высокого давления с использованием преобразователя сигналов «Теркон», позволяющего работать как с термопарами, так и с датчиками сопротивления (рис. 7). При этом с использованием установки была проведена серия экспериментальных испытаний сосудов находящихся под действием электрического тока. Целью работы

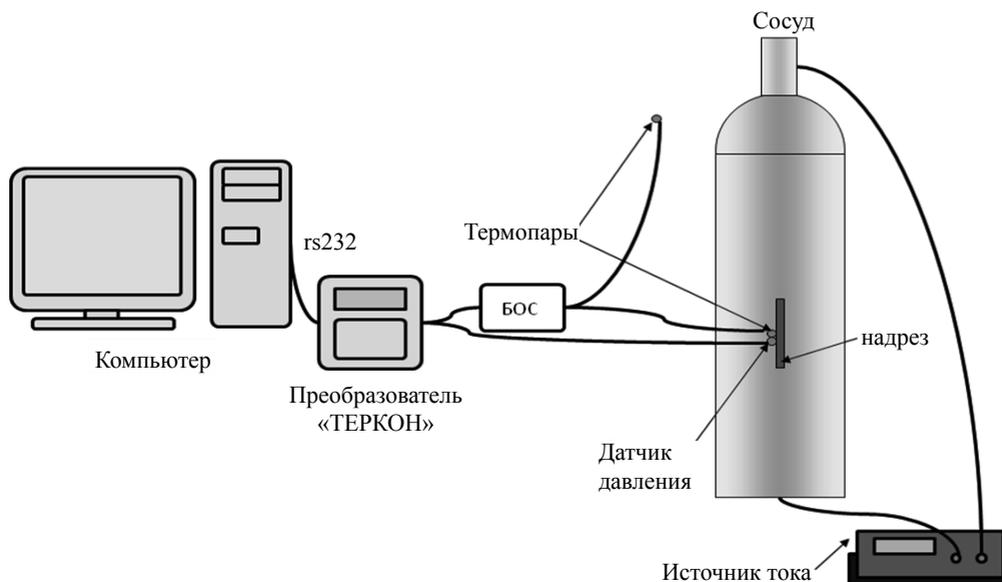


Рис. 7. Схема подведения электрического потенциала к сосуду давления

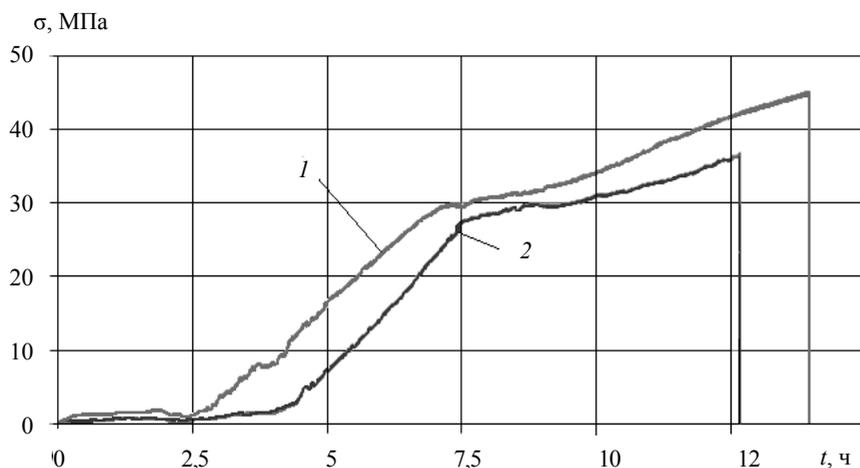


Рис. 8. Кривые разрушения сосудов давления:
1 — сосуд под воздействием электрического потенциала;
2 — сосуд без внешнего воздействия

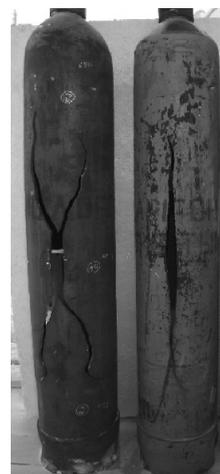


Рис. 9. Фото разрушения сосудов давления: слева — сосуд под воздействием электрического потенциала; справа — сосуд без внешнего воздействия

являлось изучение влияния слабых электрических воздействий на металлы, подвергаемые деформации, изменения их прочностных и пластических характеристик на примере стали Ст3 при низких температурах. В качестве объектов исследования воздействия электрического тока в металлических конструкциях использовали сосуды высокого давления (кислородные баллоны) объемом 40 литров из стали Ст45, с химическим составом С-0,45%, Si-0,30%, Mn-0,85% [7, 9, 11–13]. Выбор сосудов осуществлялся таким образом, чтобы год изготовления, рабочие и проверочные давления сосудов и марки стали по клейму совпадали. Также перед проведением эксперимента измерялись толщина ультразвуковым толщиномером ТУЗ-2 и периметры сосудов в трех сечениях. Испытания проводились попарно, в каждом случае вышеизложенные характеристики совпадали или имели несущественную разницу, которыми можно пренебречь, т.е. сосуды были практически одинаковы. На поверхность сосудов в центральной части наносится продольный надрез (искусственный дефект) глубиной 2 мм, шириной 2,5 мм и длиной 50 мм. Для нагружения сосуда внутренним давлением, как и в предыдущем случае, используется расширение замерзающей воды. Электрический контакт с образцами во всех экспериментах осуществлялся медным проводом диаметром 1,5 мм. На один из сосудов подается электрический ток величиной 9 В источником питания постоянного тока Б5–43, второй без воздействия тока.

Рассмотрим результаты, полученные на сосудах 1 и 2 1980 г. изготовления. Как видно из графиков (рис. 8) сосуд 1 под воздействием электрического потенциала

разрушился через 13 ч. 30 мин при давлении 43 МПа, сосуд 2 через 12 ч. 10 мин при давлении 38 МПа.

Для определения величины пластической деформации, после разрушения сосудов, были измерены периметры в ранее измеренных местах, без учета раскрытия трещины. Значения данных величин представлены в таблице.

Примечание к таблице. Числитель — исходное состояние, знаменатель — после испытания. Параметр δ определяли как отношение разности значений диаметра после разрушения и в исходном состоянии к значению диаметра в исходном состоянии. Пластическую деформацию считали как среднее.

Стоит отметить, что все сосуды, на которых был подключен электрический ток, разрушились с ветвлением трещины, а сосуды без воздействия — без ветвления трещины (рис. 9). Этот факт можно объяснить тем, что конструкция дольше сопротивляется разрушению, истощивает свою пластичность, накапливает более высокое внутреннее давление и затрачивает большую работу при разрушении [7, 9].

Список литературы

1. Иванов В. А., Большев К. Н., Алексеев А. А., Каминский В. В., Степанов Н. Н. Методика исследования ветвления трещины при низкотемпературных натуральных исследованиях. // Научное приборостроение. 2010. т. 20. №2. С. 120–125.
2. Каминский В. В., Соловьев С. М., Степанов Н. Н., Володин Н. М., Молодых А. А., Иванов В. А. Особенности свойств полупроводниковых тензо- и барорезисторов на основе сульфида самария. /VI МНК «Прочность и разрушение материалов и конструкций» — Оренбург, 2010. С. 261–269.
3. Каминский В. В. Особенности применения полупроводниковых тензо- и барорезисторов на основе сульфида самария. В. В. Каминский, А. А. Молодых, Н. Н. Степанов, С. М. Соловьев, Н. М. Володин, В. А. Иванов // Научное приборостроение. 2011. т. 21. №2. С. 120–126.
4. Каминский В. В., Володин Н. М., Сосов Ю. М., Иванов В. А. Тензорезистор/Авторское свидетельство № 1717946. Заявка № 4717046, приоритет от 11 июля 1989 г. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 8 ноября 1991 г. Коды классификатора G01B7/16, 7/18.

Пластические свойства сосудов давления (сталь 45) в исходном состоянии и после испытания на разрушение при одновременном воздействии электрического тока и без него

Условия испытания	Внешний диаметр сосуда, мм			δ , %
	верх	середина	низ	
Внешнее электрическое поле	694/701,5	692/700,5	694/701	1,08
Без воздействия электрического поля	690/695,5	692/697,5	692/697	0,77

5. Алексеев А. А., Большев К. Н., Иванов В. А., Левин А. И. Методика исследования ветвления трещины при низкотемпературных натурных испытаниях. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. т. 72. № 10. С. 39–42.

6. Alexeev A. A., Syromyatnikova A. S., Bolshev K. N., Ivanov V. A. Fracture mechanisms during crack branching. Part 2. Steel // World Applied Sciences Journal. 2013. 24 (4). 421–428 p. (indexed by Scopus).

7. Иванов В. А., Ефимов В. М., Петров З. Е., Левин А. И. Автоматизация натурных испытаний труб и сосудов высокого давления. /X Международная НПК «Актуальные проблемы современных наук». — Польша, 2014. С. 3–11.

8. Иванов В. А., Большев К. Н., Малышев А. В., Степанов А. А. Определение температурного и барического коэффициентов сопротивления барорезисторов на основе моносulfида самария. /Материалы X НТК «Современные проблемы теплофизики и теплоэнергетики в условиях Крайнего Севера» — Якутск, 2013. С. 90–96.

9. Иванов В. А., Ефимов В. М., Петров З. Е., Левин А. И. Натурные испытания труб и сосудов высокого давления. /X Международная НПК «Актуальные проблемы современных наук». — Польша, 2014. С. 16–25.

10. Иванов В. А. Измерение давления барорезисторами на основе SmS во льду, в воде и в мерзлом грунте. /В. А. Иванов, В. В. Каминский, К. Н. Большев, А. А. Степанов, С. М. Соловьев // Приборы. 2012. № 1. С. 17–23.

11. Алексеев А. А., Большев К. Н. и др. Ветвление трещины при разрушении цилиндрических оболочек из углеродистой стали внутренним давлением. // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 12. С. 33–39.

12. Большев К. Н., Иванов В. А., Малышев А. В., Степанов А. А. Низкотемпературный криостат для градуировки термометров сопротивления, термопар и барорезисторов. V Евразийский международный симпозиум по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. 2010. С. 82–83.

13. Большев К. Н. Натурные испытания магистральных труб и сосудов высокого давления. /К. Н. Большев, В. А. Иванов, А. А. Степанов, В. В. Каминский, З. Е. Петров // Промышленная теплотехника. 2014. № 1 (36), с. 80–90.

References

1. Ivanov V. A., Bol'shev K. N., Alekseev A. A., Kaminsky V. V., Stepanov N. N. Technique of research of branching of a crack in case of the low-temperature full-scale researches. *Nauchnoe priborostroenie*. 2010. v. 20. No 2. p. 120–125. (in Russian).

2. Kaminsky V. V., Solov'ev S. M., Stepanov N. N., Volodin N. M., Molodykh A. A., Ivanov V. A. Features of properties semiconductor tenzo-and barorezistor on the basis of samarium sulfide. /The VI International scientific conference «Durability and

Corrupting of Materials and Constructions» — Orenburg, 2010. p. 261–269. (in Russian).

3. Kaminsky V. V. Features of application semiconductor tenzo-and barorezistor on the basis of samarium sulfide. /V. V. Kaminsky, A. A. Molodykh, N. N. Stepanov, S. M. Solov'ev, N. M. Volodin, V. A. Ivanov. *Nauchnoe priborostroenie*. 2011. v. 21. No 2. p. 120–126. (in Russian).

4. Kaminsky V. V., Volodin N. M., Sosov Yu. M., Ivanov V. A. Tensoresistor. Copyright certificate No. 1717946.1991. (in Russian).

5. Alekseev A. A., Bol'shev K. N., Ivanov V. A., Levin A. I. Technique of research of branching of a crack in case of the low-temperature full-scale tests. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2006. v. 72. No 10. p. 39–42. (in Russian).

6. Alexeev A. A., Syromyatnikova A. S., Bolshev K. N., Ivanov V. A. Fracture mechanisms during crack branching. Part 2. Steel. *World Applied Sciences Journal*. 2013. 24 (4). 421–428 p.

7. Ivanov V. A., Efimov V. M., Petrov Z. E., Levin A. I. Automation of full-scale tests of pipes and tanks of high pressure. /X International conference «Actual Problems of the Modern Sciences». — Poland, 2014. p. 3–11.

8. Ivanov V. A., Bol'shev K. N., Malyshev A. V., Stepanov A. A. Determination of temperature and baric coefficients of resistance of barorezistor on the basis of samarium monosulfide. /Materials X of the «Modern Problems of Thermophysics and Power System in the conditions of Far North» conference. — Yakutsk, 2013. p. 90–96. (in Russian).

9. Ivanov V. A., Efimov V. M., Petrov Z. E., Levin A. I. Full-scale tests of pipes and tanks of high pressure. /X International conference «Actual Problems of the Modern Sciences». — Poland, 2014. p. 16–25.

10. Ivanov V. A. Pressure measurement by barorezistor on the basis of the SMS in ice, in water and in frozen soil. /V. A. Ivanov, V. V. Kaminsky, K. N. Bol'shev, A. A. Stepanov, S. M. Solov'ev. *Pribory*. 2012. No 1. p. 17–23. (in Russian).

11. Alekseev A. A., Bol'shev K. N. Crack branching when corrupting cylindrical jackets from carbon steel internal pressure. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2008. No 12. p. 33–39. (in Russian).

12. Bol'shev K. N., Ivanov V. A., Malyshev A. V., Stepanov A. A. The low-temperature cryostat for graduation of thermometers of resistance, thermocouples and barorezistor. The V Euroasian international symposium on problems of durability of materials and machines for regions of a frigid climate. 2010. p. 82–83. (in Russian).

13. Bol'shev K. N. Full-scale tests of the trunk pipes and tanks of high pressure. /K. N. Bol'shev, V. A. Ivanov, A. A. Stepanov, V. V. Kaminskii, Z. E. Petrov // *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2014. No 1 (36), p. 80–90. (in Russian).