

УДК 621.791.75

В.А. Иванов¹, В.М. Ефимов¹, З.Е. Петров², А.И. Левин³

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТРУБ И СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-32-36

Представлены методики испытания труб и сосудов высокого давления в условиях холодного климата, а также результаты натурных испытаний отрезков труб из стали X70 производства Харьызского трубного завода длиной 6 м, диаметром 1420 мм и модельного сосуда давления из стали 09ХГ2СЮЧ с внутренним диаметром 1000 мм и толщиной стенки 55 мм. Во время испытаний проводились тензометрирование и измерения давления, раскрытия берегов надрезов и температуры стенки. Определены этапы инициации и роста трещины. Показано, что основной металл и зона сварного соединения сосуда давления из стали 09ХГ2СЮЧ обладают одинаковой трещиностойкостью по началу стабильного подрастания трещины.

Ключевые слова: натурные испытания, разрушение, сварное соединение, деформация, давление, температура, трещиностойкость.

Methods of testing of pipes and pressure vessels in conditions of naturally cold climate as well as the results of in situ tests of 6 m long, 1420 mm in diameter X70 steel pipe segments produced at Harzis Pipe Plant, and 1000 mm in inner diameter, 55 mm wall thickness 09KhG2SYuCh steel model vessel are presented. Strain and pressure measurements, notch side opening and wall temperature measurements were conducted during the test. The stages of crack initiation and growth are determined. It is revealed that the base metal and the weld joint zone of the 09KhG2SYuCh steel pressure vessel have identical crack growth resistance at the beginning of stable crack growth.

Keywords: in situ test, fracture, weld, deformation, pressure, temperature, fracture toughness.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова» СО РАН [Federal state unitary enterprise «Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov» SB RAS] E-mail: administration@iptpn.ysn.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера» СО РАН [Federal state unitary enterprise «Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy» SB RAS] E-mail: ikfia@esn.ru

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Якутский научный центр» СО РАН [Federal state unitary enterprise «Yakut scientific center» SB RAS] E-mail: spirin@prez.ysn.ru

На станции натурных испытаний сосудов давления и труб Института физико-технических проблем Севера СО РАН им. академика В.П. Ларионова проводят испытания труб и сосудов давления в условиях холодного климата. Стенд функционально состоит из систем нагружения, обслуживания и регистрации получаемых параметров (рис. 1).

Система нагружения служит для гидравлических испытаний внутренним давлением труб и сосудов давления (до 40 МПа) и обеспечивает автоматическое выполнение следующих режимов при заданном давлении: циклическое нагружение – от 0 до 20 МПа, ступенчатое и статическое нагружение – до разрушения испытываемых объектов.

Система нагружения состоит из расходного бака с расходомером (Б1), фильтра тонкой очистки (Ф2), насоса высокого давления (Н2), вентиля с электроприводами (ВЭ1, ВЭ2, ВЭ3 и ВЭ4), регулирующих вентилях (ВН8 и ВН9), управляющих электроконтактных манометров (МН1 и МН3), предохранительного электроконтактного манометра (МН2) и пульта управления.

Система подготовки к испытаниям служит для

заполнения испытываемых сосудов и расходного бака рабочей жидкостью, а также для откачки рабочей жидкости из бункера после разрушения сосуда. Она состоит из цистерны для хранения рабочей жидкости (Ц1), насоса низкого давления (Н1) и фильтра грубой очистки (Ф1).

На станции натурных испытаний сосудов давления и труб проведены испытания труб среднего (из стали 09Г2С – диаметром 530 мм с толщиной стенки 7 мм) и большого диаметра (из стали X70 – диаметром 1420 мм с толщиной стенки 15,7 мм). Испытаны также модельные малый (из стали 09Г2СЮЧ – диаметром 800 мм с толщиной стенки 10 мм) и большой сосуда давления (из стали 09ХГ2СЮЧ – с внутренним диаметром 1000 мм и толщиной стенки 55 мм).

Во время испытаний проводили тензометрирование и измерения давления, раскрытия берегов надрезов и температуры стенки. В данной статье рассмотрены результаты натурных испытаний отрезков труб из стали X70 длиной 6 м и диаметром 1420 мм, а также модельного большого сосуда давления.

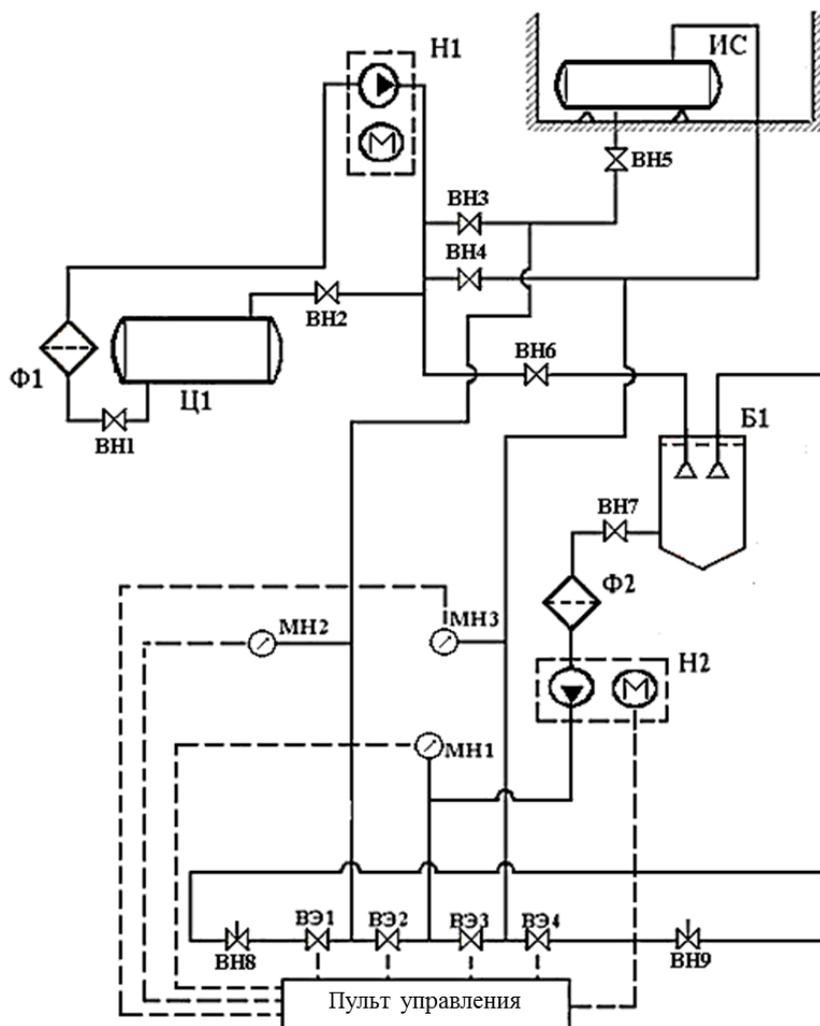


Рис. 1. Схема стенда для проведения низкотемпературных натуральных испытаний труб и сосудов давления:
 ИС – испытуемый сосуд; Ц1 – цистерна для хранения рабочей жидкости; Н1 – насос низкого давления;
 Ф1 – фильтр грубой очистки; Б1 – расходный бак; Н2 – насос высокого давления; Ф2 – фильтр тонкой очистки;
 ВН1–ВН9 – вентили; ВЭ1–ВЭ4 – вентили с электроприводами; МН1–МН3 – электроконтактные манометры



Рис. 2. Общий вид испытанной трубы из стали X70

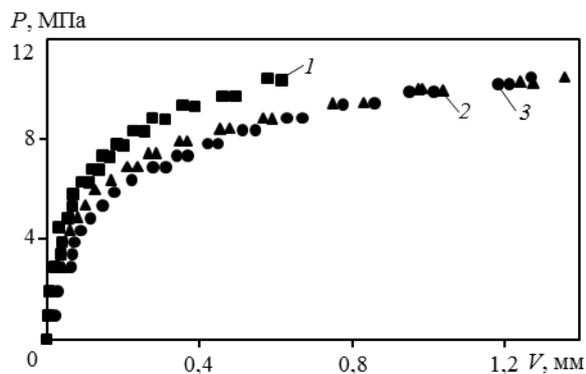


Рис. 3. Зависимость раскрытия берегов надрезов V от давления P : 1–3 – номера надрезов на основном материале трубы

На основной материал трубы нанесли три надреза разной длины: 91,2; 144,4 и 194,3 мм. Глубина надрезов составила 7,3 мм. Испытание проводили при температуре -20°C , труба разрушилась при давлении 10,3 МПа от третьего надреза в основном металле (длиной 194,3 мм) по механизму вязкого разрушения. Разрушающее окружное напряжение достигло предела текучести материала трубы. В изломе обнаружили трещины расслоения (полосчатость), ориентированные вдоль направления прокатки.

На рис. 2 представлено изображение трубы из стали X70, разрушенной на стенде при испытании в условиях низких климатических температур.

На рис. 3 приведен график зависимости раскрытия берегов надрезов (V) на разрушаемой трубе от внутреннего давления P .

Модельный сосуд изготовлен из хладостойкой стали 09ХГ2СЮЧ с внутренним диаметром 1000 мм и толщиной стенки 55 мм [1]. Продольные и кольцевые швы выполнены способом электрошлаковой сварки без нормализации. На сосуд наносили два одинаковых поверхностных надреза длиной 100 мм и глубиной 7 мм (рис. 4). Надрез Н1 располагался поперек кольцевого шва сосуда, а надрез Н2 – в основном металле вдоль образующей обечайки.

При гидравлических испытаниях сосуд не был доведен до разрушения по техническим причинам. Поэтому для его разрушения использовано нагружение внутренним давлением, создаваемым за счет льдообразования в замкнутых полостях [2]. Сосуд был заполнен водой и заглушен при температуре окружающего воздуха -38°C .

Размер дефектов рассчитывали заранее на основе данных о вязкости разрушения различных участков сварного соединения, исходя из условия наступления разрушения сосуда при статическом нагружении, когда окружные напряжения достигнут предела текучести. В вершинах надрезов в процессе циклического нагружения (8480 циклов) при низких климатических температурах были выращены усталостные трещины. Термопары устанавливали на наружной поверхности сосуда и по толщине стенки на глубине 15 мм.

Продолжительность испытания (от наполнения сосуда водой до разрушения) составила приблизительно 105 ч. Изменение температуры стенки сосуда носит колебательный характер (рис. 5), что связано с периодическим переохлаждением водяного ядра при сбросе внутреннего давления из-за пластического деформирования металла сосуда.

Схематическая развертка сосуда в плоскости с картой разрушения приведена на рис. 6. Цифрами обозначены углы ветвления трещин. Разрушение произошло путем отрыва при множественном ветвлении трещины по всей длине сосуда. Конечная толщина стенки сосуда (основной металл) составила 52 мм. При визуальном осмотре выявлено наличие внутренней ледяной цилиндрической оболочки с толщиной стенки 180 мм и шугового льда, образовавшегося вследствие резкого

переохлаждения водяного ядра при динамическом разрушении сосуда. Суммарная площадь разрушения S , определенная умножением общей длины трещин на толщины стенки сосуда, составила $0,454 \text{ м}^2$. Проведен оценочный расчет удельной энергии, затраченной на образование новых поверхностей. При этом принято, что на разрушение расходовалась вся упругая энергия, накопленная в стенке сосуда к моменту разрушения.

Упругую энергию можно приблизительно вычислить по формуле:

$$U \approx V\sigma_T^2 / 2E,$$

где V – объем обечайки; σ_T – предел текучести основного металла; E – модуль упругости стали.

В данном случае удельную энергию $u=U/S$ получили равной величине 68 Дж/см^2 , что практически совпадает со значением ударной вязкости для образца из этой стали с V-образным надрезом [3]. На рис. 7 представлен общий вид разрушенного сосуда.

Инициация разрушения произошла от первого надреза. Изменение раскрытия берегов надрезов 1 и 2 (рис. 8) происходило в три этапа: упругое раскрытие, пластическое раскрытие вершины усталостной трещины и стабильный рост трещины. Первые два этапа для трещин обоих надрезов практически совпадают, а на третьем этапе скорость роста трещины от надреза Н1 больше, чем от Н2.

Результаты испытаний сварных сосудов давления из новых сталей марок 09Г2СЮЧ и 09ХГ2СЮЧ, упрочненных методом «межкритической» нормализации [1], при низких климатических температурах показали, что основной металл и зона сварного соединения обладают одинаковой трещиностойкостью по началу стабильного подрастания трещины.

Результаты тензометрирования по показаниям в измерительных точках 4, 6 и 8, показанных на рис. 4, представлены на рис. 9. Тензорозетка 8 находится в центральной части обечайки сосуда на основном металле. Тензорозетка 6 располагается на стыке кольцевого и продольного сварных швов. Тензорозетка 4 находится на продольном сварном шве.

Окружная деформация в точке 8 (рис. 9, а) линейно зависит от продолжительности испытания, что соответствует жесткой схеме нагружения сосуда.

Продольные деформации в точках 4 (рис. 9, в) и 8 (рис. 9, а) имеют четко выраженный максимум, что обусловлено образованием внутренней ледяной оболочки, следствием которого является уменьшение продольного усилия в стенке сосуда. Таким образом, сварной шов чувствителен к изменению двухосного напряженного состояния сосуда в процессе нагружения.

Продольные деформации в измерительной точке 6 (рис. 9, б) не имеют максимума и монотонно возрастают до значения $0,32\%$. В целом видно (рис. 9, а, в), что при таком способе создания внутреннего давления реализуется сложное нагружение сосуда.

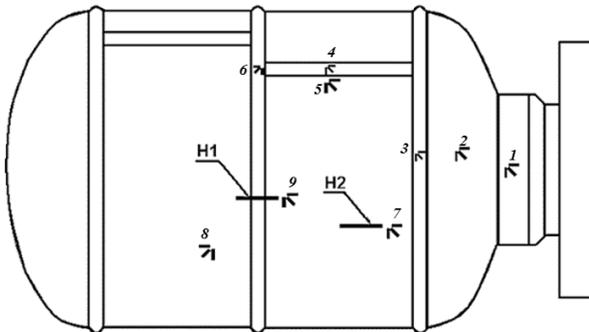


Рис. 4. Сосуд высокого давления и схема расположения на нем тензорозеток и надрезов: 1–9 – номера тензорозеток; H1 и H2 – номера надрезов на сосуде давления

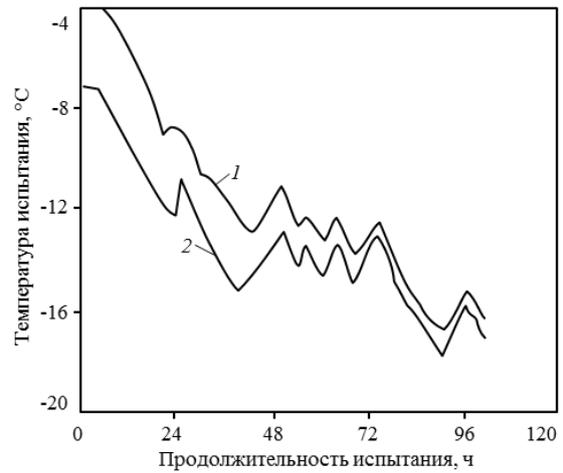


Рис. 5. Изменение температуры стенки сосуда из стали 09ХГ2СЮЧ в зависимости от продолжительности испытания: 1 – температура стенки на глубине 15 мм; 2 – температура на наружной поверхности сосуда давления

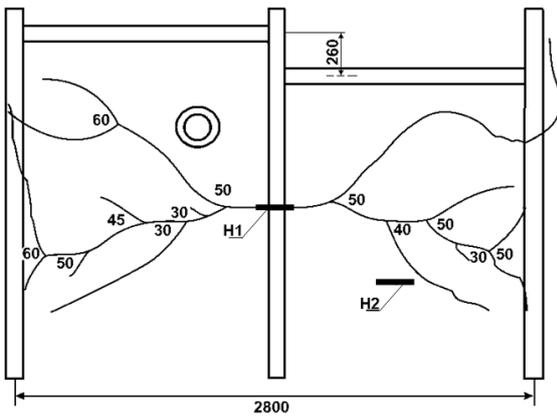


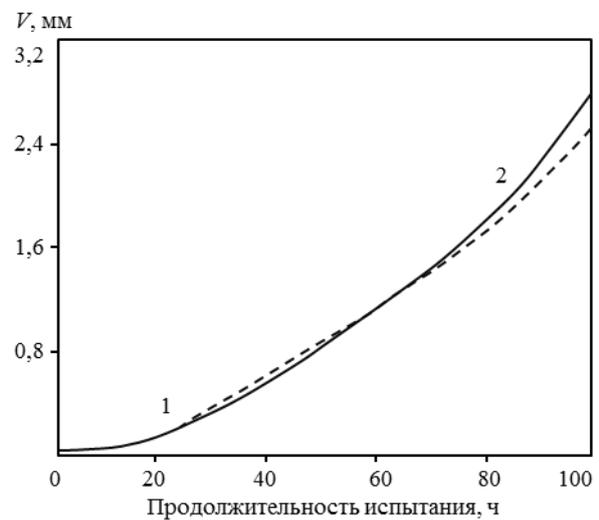
Рис. 6. Карта разрушения сосуда из стали 09ХГ2СЮЧ: H1 и H2 – номера надрезов на сосуде давления; 30–60 – углы ветвления трещин (в град)



Рис. 7. Общий вид разрушенного сосуда

Рис. 8. Изменение раскрытия берегов надрезов V в зависимости от продолжительности испытания сосуда из стали 09ХГ2СЮЧ:

1 – начало затупления вершины трещины; 2 – начало стабильного роста трещины; - - - раскрытие трещины в надрезе H1; — раскрытие трещины в надрезе H2 (см. рис. 4)



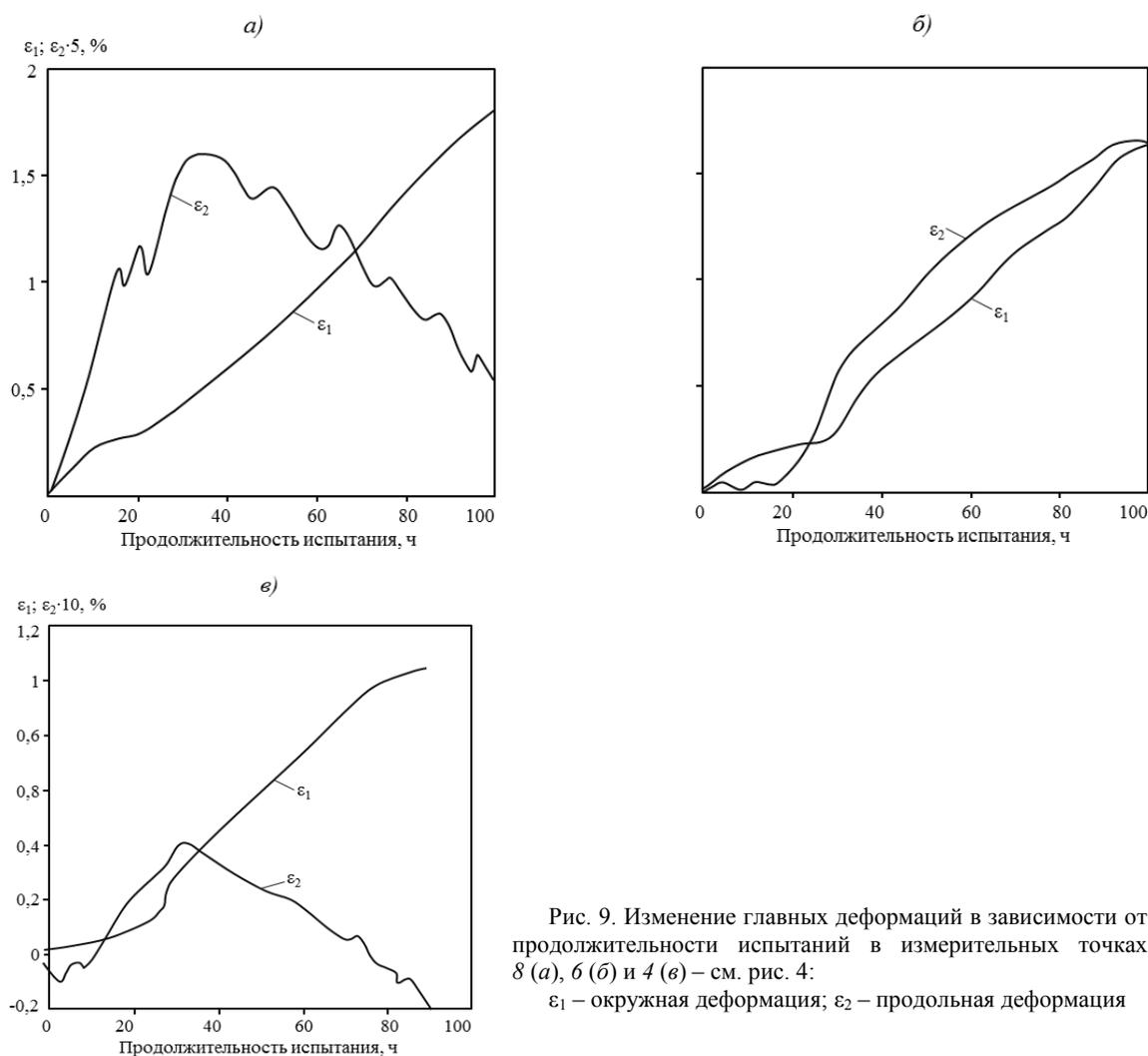


Рис. 9. Изменение главных деформаций в зависимости от продолжительности испытаний в измерительных точках 8 (а), 6 (б) и 4 (е) – см. рис. 4:

ε_1 – окружная деформация; ε_2 – продольная деформация

Выводы

На станции натурных испытаний сосудов давления и труб проведены испытания труб среднего (из стали 09Г2С – диаметром 530 мм с толщиной стенки 7 мм) и большого диаметра (из стали X70 – диаметром 1420 мм с толщиной стенки 15,7 мм), отработана методика испытаний при низких климатических температурах.

Для разрушения модельного сосуда давления из стали 09ХГ2СЮЧ с внутренним диаметром 1000 мм и толщиной стенки 55 мм использована методика нагружения внутренним давлением, создаваемым за счет льдообразования в замкнутых полостях. Продолжительность испытания (от наполнения сосуда водой до разрушения) составила приблизительно 105 ч. При испытаниях изменение температуры стенки сосуда имело колебательный характер.

Результаты низкотемпературных испытаний сварных сосудов давления, изготовленных из упрочненных методом «межкритической» нормализации сталей марок 09Г2СЮЧ и 09ХГ2СЮЧ и имеющих усталостные трещины, показали, что основной металл и зона сварного соединения обладают одинаковой трещиностойкостью по началу стабильного подрастания трещины.

Измерение напряженно-деформированного состояния сосуда давления показало, что при способе создания внутреннего давления за счет льдообразования в замкнутых полостях реализуется сложная и жесткая схема нагружения сосуда.

Основной металл и сварной шов сосуда чувствительны к изменению двухосного напряженного состояния сосуда в процессе испытания.

ЛИТЕРАТУРА

- Егорова С.В., Юрчишин А.В., Солина Е.Н. и др. Хладостойкая сталь повышенной прочности 09ХГ2СЮЧ для сварных сосудов высокого давления // Автоматическая сварка. 1992. №9–10. С. 37–42.
- Пехович А.И. Основы гидродетермики. Л.: Энергоатомиздат. 1983. 200 с.
- Семенов Я.С., Федоров С.П., Гилязов А.А. Оценка релаксационных процессов при движении магистральной трещины // Газовая промышленность. 2007. №7. С. 63–65.