
**НОВЫЕ ПРИБОРНЫЕ РАЗРАБОТКИ
И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ**

УДК 621.791.75

**© В. А. Иванов, К. Н. Большев, А. А. Алексеев,
В. В. Каминский, Н. Н. Степанов****МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИНЫ
ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ**

Разработана методика испытаний сосудов высокого давления с искусственным дефектом (надрезом) внутренним давлением с регистрацией данных в режиме реального времени для исследования ветвления трещины в цилиндрических оболочках. Проведена серия натурных испытаний сосудов высокого давления из стали-55 с продольным надрезом в средней части сосуда. Проведен анализ вида разрушения в зависимости от начального надреза. Определены критические значения разрушающего давления для ветвления трещины.

Кл. сл.: деформация, ветвление трещины, датчик давления, моносulfид самария, замораживание воды

ВВЕДЕНИЕ

Описание процесса разрушения материалов является одной из наиболее сложных задач в современной механике и физике твердого тела. Исследованию распространения трещины в твердом теле посвящено немало аналитических и экспериментальных работ, однако остается ряд нерешенных или только частично решенных проблем, среди которых ветвление трещины при ее динамическом распространении является одной из самых малоизученных. Ветвление трещины — это явление, которое наблюдается в самых различных материалах, таких как стекло, сталь, алюминий, полимеры и скальные породы. Экспериментальные и теоретические аспекты этой проблемы изучались в работах ряда авторов [1–6] на примере исследования динамического распространения трещины в модельном материале (полиметилметакрилат, эпоксидная смола, Nomalite-100). Пристальное внимание уделялось вопросу разработки единого критерия оценки ветвления трещины, поскольку, несмотря на достаточно большое количество работ по данной проблематике, в настоящее время отсутствует единство взглядов на причины этого явления, а исследования разных авторов нередко приводят к противоречивым результатам. Последнее десятилетие было ознаменовано новым всплеском интереса к проблеме ветвления трещины, и в современных работах [7–11], посвященных исследованию динамического распространения трещины в модельном материале (полиметилметакрилате), в качестве критерия оценки ветвления трещины выдвинут критерий критической скорости распространения трещины при ветвлении. Обращает на себя внимание тот факт, что практически нет работ, посвященных изучению ветвления тре-

щины в конструкционных материалах (сталях), поскольку подобные исследования связаны, во-первых, с большими техническими трудностями в получении ветвления трещины при разрушении образца и, во-вторых, с несовершенством измерительной аппаратуры. В то же время ветвление трещины, возникающее в трубопроводах и цилиндрических оболочках, — нередкое явление, приводящее к полному разрушению конструкций [12–15]. Эти протяженные и лавинные разрушения наносят большой материальный ущерб, и поэтому исследование ветвления трещины в сталях является актуальной проблемой современной фундаментальной и прикладной механики разрушения.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования распространения и ветвления трещины, условий ее ветвления при натурных испытаниях сосудов высокого давления внутренним давлением.

Для экспериментального исследования ветвления трещины в сталях разработана методика испытаний сосудов высокого давления с искусственным дефектом (надрезом) внутренним давлением с регистрацией данных в режиме реального времени [16]. Согласно данной методике, для нагружения сосуда внутренним давлением используется расширение замерзающей воды, т. е. сосуд, наполненный жидкостью и герметизированный, подвергается воздействию низких температур. Вода по мере кристаллизации расширяется, создавая тем самым внутреннее давление, которое по достижении его критического уровня в итоге разрушает сосуд в области искусственного дефекта.

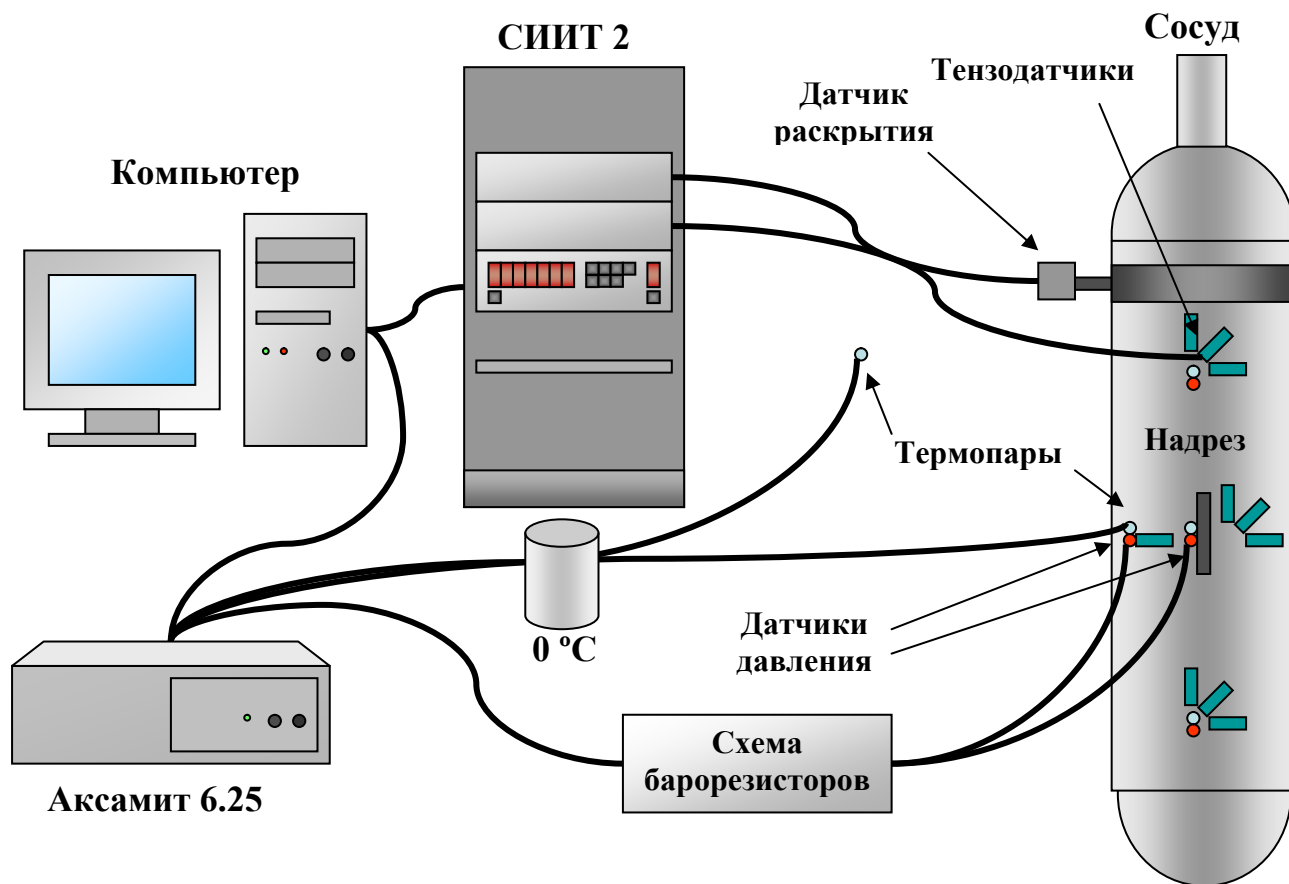


Рис. 1. Схема автоматизированной установки

Данная схема нагружения является жесткой, без релаксации напряженно-деформированного состояния стенок сосуда: в ходе кристаллизации воды, образуется ледяная оболочка на внутренней стенке сосуда с жидким ядром в центре, в результате чего внутреннее давление, увеличивающееся по мере нарастания льда со стороны жидкого ядра, передается на стенки сосуда через твердое тело — лед.

Для непрерывного получения данных в ходе экспериментов разработан автоматизированный измерительный комплекс. Установка реализована на базе двух измерительных систем: компьютерно-измерительной системы (КИС) "Аksamит 6.25", информационно-измерительной системы (ИИС) "СИИТ 2" и персонального компьютера (см. рис. 1). ИИС "СИИТ 2" была модернизирована для соединения с персональным компьютером IBM PC посредством платы сопряжения ЛА-32Д на интерфейсе ISA. КИС "Аksamит 6.25" соединяется с персональным компьютером по стандартному интерфейсу RS-232.

Комплекс производит измерение и регистра-

цию внутренней и внешней температур сосуда, давления внутри сосуда и деформации стенок сосуда. В качестве датчиков температуры используются медь-копелевые термопары, изготовленные из проводов Ø0.2 мм. Термопары с проводами такого диаметра обладают малой инертностью и достаточной прочностью. В качестве опорной точки термопар используется температура тающего льда в сосуде Дьюара.

Датчики давления представляют собой барорезисторы на основе полупроводникового моносulfида самария (SmS). Принцип действия указанных датчиков основан на зависимости электросопротивления рабочего слоя от давления и температуры, что позволяет, зная температуру датчика, вычислить давление. Отличительной особенностью таких полупроводниковых тонкопленочных барорезисторов является высокая степень линейности изменения логарифма их электросопротивления при изменении давления и вариации температуры в климатическом интервале (см. рис. 2, 3). Физической причиной такого поведения электросопротивления датчиков при изменении температуры

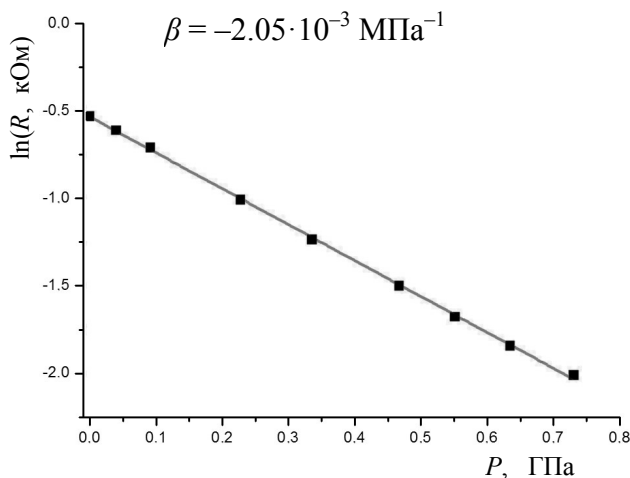


Рис. 2. Барическая зависимость логарифма электросопротивления тонкопленочного барорезистора на основе SmS.

β — барический коэффициент электросопротивления

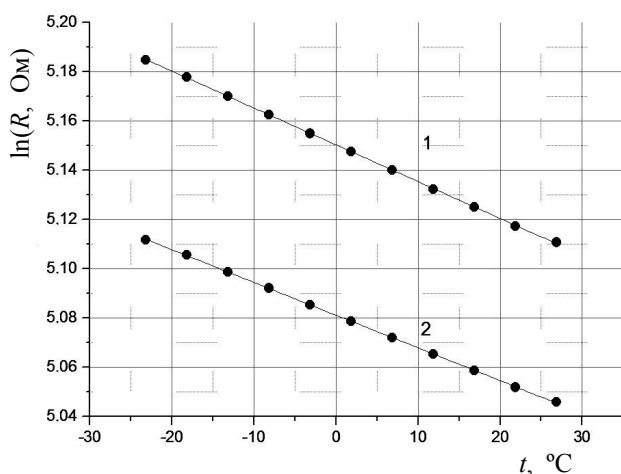


Рис. 3. Температурная зависимость логарифма электросопротивления тонкопленочных барорезисторов на основе SmS.

1 — барорезистор с электросопротивлением $R = 166$ Ом при температуре $t = 25$ °C и термическим коэффициентом электросопротивления $\text{TKC} = 1.63 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$; 2 — барорезистор с электросопротивлением $R = 156$ Ом при температуре $t = 25$ °C и термическим коэффициентом электросопротивления $\text{TKC} = 1.36 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$

и давления является активационный характер электропереноса в SmS, при котором в результате изменения давления или температуры в материале заметно меняется только концентрация свободных

носителей тока (электронов проводимости), в то время как их подвижность остается практически постоянной. Барический коэффициент электросопротивления барорезисторов находится в интервале $(1 \div 3) \cdot 10^{-3}$ МПа $^{-1}$, а температурный — в интервале $(1 \div 5) \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$. Линейность логарифмических зависимостей электросопротивления барорезисторов от давления и температуры существенно упрощает вычисление давления и повышает надежность результата.

Датчики на основе SmS были разработаны ИФТПС СО РАН, совместно с ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (авторское свидетельство СССР № 1717946). Удобство использования таких датчиков проявляется в том, что их можно помещать непосредственно в сам сосуд и, таким образом, измерять давление в различных областях внутри объема сосуда.

Для измерения упругих деформаций используются тензодатчики, представляющие собой приклеиваемые тензорезисторы КФ-5 с сопротивлением 100 Ом и базой 5 мм. Для измерения пластических деформаций используются датчики перемещения, смонтированные по мостовой схеме из тензодатчиков с сопротивлением 400 Ом.

Для регистрации данных с термопар и датчиков давления используется КИС "Аксамит 6.25". Для регистрации данных с датчиков перемещения и тензодатчиков используется ИИС "СИИТ 2".

Для автоматической регистрации данных в процессе эксперимента написана программа на языке Turbo Pascal 7.1. Данная программа использует механизм адаптивного опроса, т. е. она производит опрос всех датчиков с максимально возможной частотой и производит запись данных в файл только при наличии превышающих заданную величину изменений. Интерфейс программы представляет собой графическое окно с четырьмя графиками данных по времени (температура, давление, перемещение и деформация).

В программе также предусмотрена возможность калибровки КИС "Аксамит 6.25" по образцовому сопротивлению в процессе эксперимента и возможность перехода к увеличенному виду одного из четырех графиков. Результаты измерений записываются в виде блоков первичных данных (по 10 опросов в каждом блоке) в типизированный файл с расширением ".dat".

Для обработки и анализа полученных данных написана программа на языке Delphi 7 в среде Windows. Программа считывает из файлов данных первичную информацию и преобразует ее в четыре графика параметров (рис. 4). Помимо графиков программа выводит листинг всех данных по блокам. Кроме того, в программе реализована возможность увеличения или уменьшения (zoom) графиков до необходимого пользователю масштаба и возможность выбора отображаемых данных из списка.

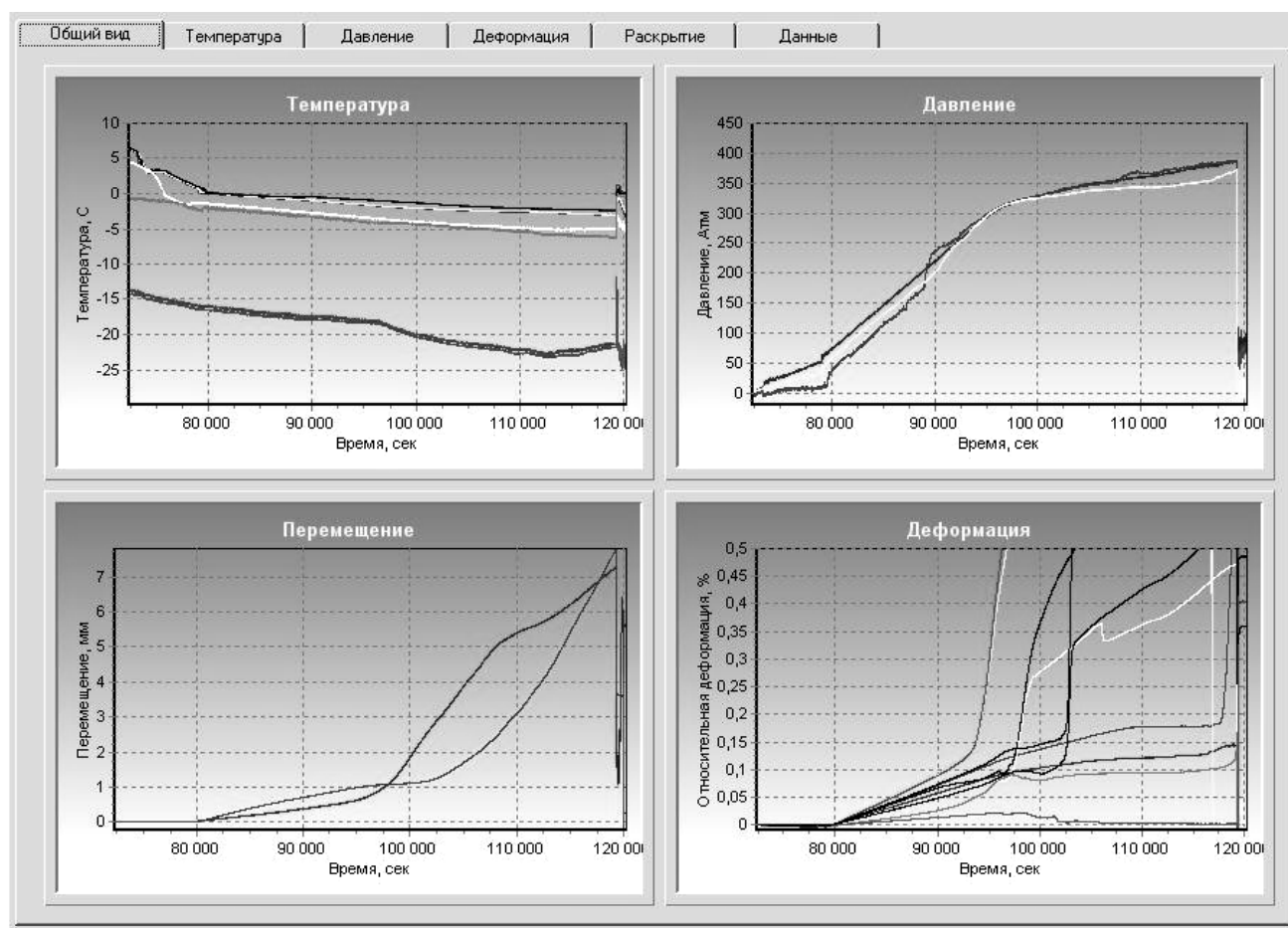


Рис. 4. Интерфейс программы обработки данных

Для проведения испытаний были выбраны сосуды высокого давления из стали-55 в нормализованном состоянии. Диаметр сосуда 219 мм, длина 1370 мм, толщина стенки 8 мм. На поверхность сосуда в центральной части наносится продольный надрез (искусственный дефект) глубиной 2 мм, шириной 2 мм, длина надреза была различной (варьировалась от 50 до 100 мм) (см. рис. 5). Температура проведения экспериментов во всех случаях была одинаковой ($-15 \div -20$ °C).

На поверхности сосуда устанавливались тензодатчики в виде тензорозеток для измерения деформаций в трех направлениях в верхней, средней и нижней части сосуда, и термопары для измерения температуры на поверхности сосуда. Датчики перемещения устанавливались в верхней и нижней частях сосуда (см. рис. 1).

Внутри сосуда с помощью металлической крестовины со складывающейся поперечной частью устанавливались датчики давления в сопровождении термопар. Датчики устанавливались в середи-

не сосуда в верхней, средней и нижней частях и у стенки сосуда (см. рис. 1). Все датчики были тщательно изолированы и герметизированы во избежание контакта с водой.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Была проведена серия натурных испытаний сосудов высокого давления из стали-55 с продольным надрезом в средней части сосуда. Размеры продольного надреза: глубина 2 мм, ширина 2 мм, длины надреза — 50, 60, 70, 90 мм. Распространение трещины во всех случаях инициировалось от надреза. Длительность экспериментов составляла от 8 до 25 часов.

Из анализа показаний датчиков сосуда, испытанного с продольным надрезом длиной 70 мм, можно увидеть (рис. 6) следующее:

— по показаниям тензодатчиков: упругая поперечная деформация достигла предела при давлении 31 МПа, далее развивалась пластическая

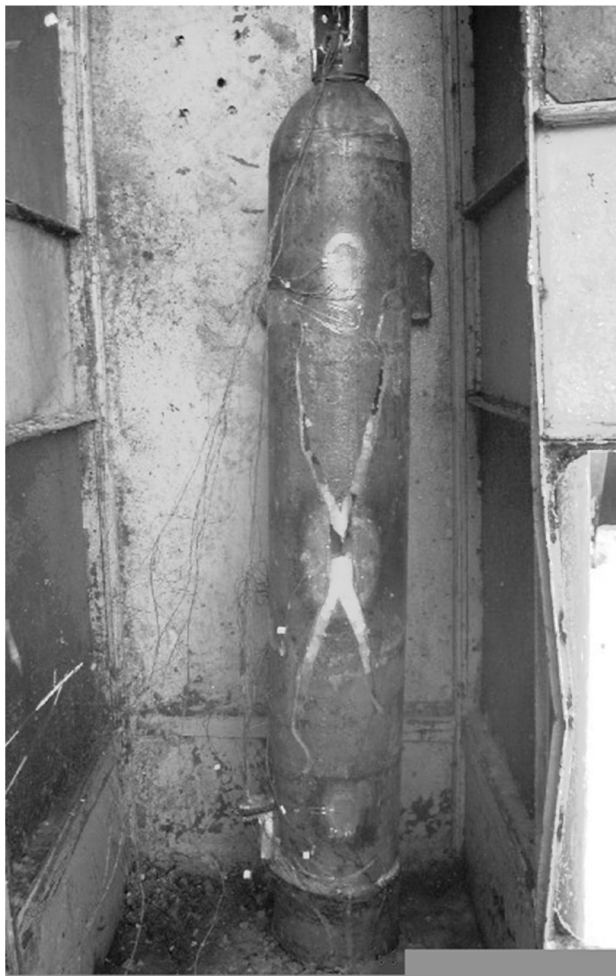


Рис. 5. Общий вид разрушения сосуда

деформация; продольная деформация до разрушения сосуда оставалась в пределах упругой области, что указывает на жесткую схему нагружения сосуда;

– по показаниям датчиков перемещения: максимальное перемещение составило 7.8 мм;

– по показаниям термопар: средняя температура наружного воздуха -20°C , температура стенки сосуда в момент разрушения -5°C , температура внутри сосуда в момент разрушения -3°C , что сравнимо с условиями эксплуатации реальных подземных магистральных трубопроводов;

– по показаниям датчиков давления: давление разрушения сосуда составило 39 МПа.

Из анализа разрушений сосудов установлено, что при длине надреза 50 мм получено ветвление трещины в обе стороны от начального надреза (см. рис. 5). При длине надреза 90 мм сосуд разрушился без ветвления трещины. Установлено, что при длине надреза более 90 мм, при понижении давле-

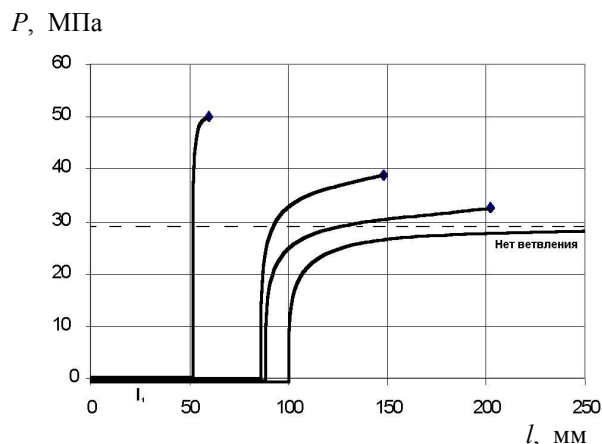


Рис. 6. Зависимость длины трещины от внутреннего давления.

l_1 — длина начального надреза, l — длина трещины в точке ветвления, P — давление разрушения сосуда

ния разрушения сосуда ниже 30 МПа ветвления трещины при распространении последней от начального надреза не происходит. Кроме того, получены данные зависимости длины трещины от начального надреза до точки ветвления от внутреннего давления (см. рис. 6).

Представленные результаты позволяют предположить, что необходимым условием ветвления трещины, является не только достижение критической скорости трещины, но также, и уровень накопленной энергии деформации конструкции, которая расходуется на распространение трещины. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования могут служить основой для разработки критерия оценки перехода от прямолинейного распространения трещины к режиму ветвления при динамическом разрушении. Данный критерий является необходимым для оценки условий перехода от локального разрушения конструкции к протяженным и лавинным разрушениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
2. Немец Я., Серенсен СВ., Стреляев В.С. Прочность пластмасс. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
3. Финкель В.М. Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
4. Ravi-Chandar K., Knauss W.G. An Experimental Investigation into Dynamic Fracture: III. On Steady-State Crack Propagation and Crack Branching // International Journal of Fracture. 1984. N 26. P. 141–154.
5. Kobayashi A.S., Ramulu M. Mechanics of Crack Curving and Branching a Dynamic Fracture Analysis // In-

- ternational Journal of Fracture. 1985. N 27. P. 187–201.
6. Knauss K.R.-C. Some Basic Problems in Stress Wave Dominated Fracture // International Journal of Fracture. 1985. N 27. P. 127–143.
 7. Наймарк О.Б., Баранников В.А., Давыдова М.М. и др. Динамическая стохастичность и скейлинг при распространении трещины // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, № 6. С. 67–77.
 8. Уваров С.В. Экспериментальное исследование эффектов нелинейной динамики распространения трещин. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Пермь, 2000. 131 с.
 9. Плехов О.А. Моделирование нелинейной динамики трещин и локализованного разрушения в волнах нагрузки. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Пермь, 2000. 16 с.
 10. Бедий И.Н. Кинетика быстрых трещин и их ветвление. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1990. 17 с.
 11. Sharon E., Fineberg J. Microbranching Instability and the Dynamic Fracture of Brittle Materials // Physical Review B. 1996. V. 54, N 10. P. 7128–7139.
 12. Красовский А.Я., Красико В.Н. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. Киев: Наукова думка, 1990. 176 с.
 13. Разрушение. Пер. с англ. В 7 т. Т. 5. Расчет конструкций на хрупкую прочность / Либовиц Г. (ред.). М.: Машиностроение, 1977. С. 146–207.
 14. Макаров Г.И. Протяженные разрушения магистральных газопроводов. М.: Академия, 2002. 208 с.
 15. Большаков А.М., Голиков Н.И., Алексеев А.А., Иванов А.Р. Исследование причин аварий магистрального газопровода Бэргэ-Якутск // Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф. Проблемы защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (в 3 т.). Т. 2. Тр. научных конференций. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2003. С. 62–68.
 16. Лыглаев А.В., Федоров С.П., Левин А.И. и др. Хладостойкость и прочность крупногабаритных тонкостенных элементов конструкций // Заводская лаборатория. 1998. № 6. С. 52–55.

Институт физико-технических проблем СО РАН, г. Якутск (Иванов В.А., Большев К.Н., Алексеев А.А.)

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург (Каминский В.В., Степанов Н.Н.)

Контакты: Степанов Николай Николаевич, stnick@hotmail.ru

Материал поступил в редакцию 26.02.2010.

TECHNIQUE OF RESEARCH OF BRANCHING OF THE CRACK AT LOW TEMPERATURE NATURAL TESTS

V. A. Ivanov¹, K. N. Bol'shev¹, A. A. Alexseev¹,
V. V. Kaminski², N. N. Stepanov²

¹*Institute of Physical and Technical Problems of the North SD RAS, Yakutsk*

²*A.F. Ioffe Physical Technical Institute RAS, St.-Petersburg*

The technique of testing of high pressure vessels with artificial defect (cut) by internal pressure was developed. Data were recorded in a mode of real time for research of a crack branching in cylindrical covers. Series of natural tests of high pressure vessels made of steel 55 have been performed. The vessels had a longitudinal cut on their middle part. The analysis of type of destruction depending on an initial cut has been made. Critical values of destroying pressure for crack branching were defined.

Keywords: deformation, split branching, pressure sensor, samarium monosulfide, water freezing