

УДК 539.8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ГАЗОВЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА
ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ**

© 2011 г.

*А.П. Цой, В.Ю. Мельцас*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров

TsoyAP64@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Проведено исследование конструкционной прочности электросварных прямошовных газовых труб при внутреннем взрывном нагружении. Труба рассматривается как конструкция, состоящая из основного металла, сварных швов, линий сплавления основного металла и сварных швов. В ходе исследования были опробованы три схемы доведения образцов труб до разрушения, т.е. образования сквозной по толщине магистральной трещины. Установлены особенности реакции труб при испытании по каждой схеме нагружения, определен перечень измерительных методик для обеспечения информативности опытов. В серии опытов по схеме многократного нагружения опытного образца трубы с постепенным нарастанием мощности нагружающего заряда взрывчатого вещества (ВВ) определена величина окружной пластической деформации, при которой происходит разрушение основного металла труб; разрушение носило вязкий характер и сопровождалось большими пластическими деформациями. В опытах по схеме однократного нагружения разрушающим зарядом ВВ произошло «аномальное» разрушение образца трубы при средней по сечению окружной деформации значительно ниже критической для основного металла: хрупкая трещина прошла по линии сплавления, т.е. проявилась пониженная пластичность и трещиностойкость зоны линии сплавления. Полученные экспериментальные данные применялись для верификации численных кодов, моделирующих динамическую реакцию и разрушение труб при больших пластических деформациях. Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали возможности метода взрывного испытания для определения стойкости к разрушению газовых труб при достижении больших пластических деформаций.

Ключевые слова: электросварная прямошовная газовая труба, взрывное нагружение, заряд ВВ, магистральная трещина.

В настоящем исследовании предложено применить технику взрывного эксперимента для определения конструкционной прочности газовых труб, используемых в строительстве магистральных газопроводов (МГ) высокого давления. Труба рассматривается как конструкция, состоящая из ряда элементов (основной металл трубы, сварные швы, зоны линии сплавления основного металла и сварных швов), имеющих различные механические свойства. Для демонстрации возможностей данного метода проведены экспериментальные исследования электросварных прямошовных газовых труб, имеющих наружный диаметр 1220 мм и толщину стенки 17.8 мм, изготовленных из стали класса прочности К60 при внутреннем взрывном нагружении.

Опыты проводились на натурных трубах разных производителей, отличающихся наличием одного или двух продольных сварных швов. В экспериментах трубы длиной 3-4 диаметра с открытыми торцами устанавливались горизонтально на две расположенные по краям опоры из низ-

коплотного материала (дерево или пенопласт плотностью до 0.3 г/см³). Нагружение труб производилось путем подрыва зарядов взрывчатого вещества (ВВ) в форме шара с энергосодержанием от 5 до 35 кг тротилового эквивалента, которые устанавливались в их геометрическом центре на деревянной подставке.

В ходе исследования были опробованы следующие схемы доведения труб до разрушения (образования сквозной по толщине магистральной трещины): 1) многократное нагружение с нарастанием массы заряда ВВ; 2) однократное нагружение предположительно разрушающим зарядом ВВ; 3) многократное нагружение с уменьшением массы заряда ВВ.

Для обеспечения информативности опытов применялись следующие измерительные методики: высокоскоростная фотохронография и видеосъемка, тензометрирование, радиоинтерферометрия, электроконтактные измерения. Установлены особенности реакции труб при испытании по каждой схеме. Выявлены следующие законо-

мерности деформирования труб в проведенных испытаниях:

- во всех опытах скорость деформации труб составляет величину порядка 10^1 – 10^2 с⁻¹;
- максимальные деформации реализуются в сечении, проходящем через центр заряда ВВ, при этом заметные пластические деформации наблюдаются на расстояниях вдоль образующей трубы порядка наружного радиуса трубы в обе стороны от сечения, проходящего через центр заряда ВВ;
- сварные швы работают как ребра жесткости, вызывая некоторое снижение деформаций в околошовной зоне трубы;
- образующиеся магистральные трещины формируются и стартуют вдоль образующей труб, что является следствием преобладания окружных напряжений над продольными.

Разрушение труб произошло в испытаниях по схемам 1 и 2.

В серии испытаний по схеме 1 определен интервал окружной пластической деформации, при которой происходит разрушение основного металла трубы: 18,5–21% для двухшовной трубы и 25–31% для одношовной трубы. При этом разрушение носило вязкий характер и сопровождалось большими пластическими деформациями; длина образовавшихся трещин составила 400 и 280 мм для двухшовной и одношовной трубы соответственно (рис. 1). Полученные величины разрушающих окружных деформаций хорошо согласуются с величиной относительного удлинения при разрушении, полученной при статическом растяжении стандартных образцов, изготовленных из той же стали (20% – для двухшовной трубы, 25% – для одношовной трубы).



Рис. 1

В испытании двухшовной трубы по схеме 2 произошло ее разрушение с образованием магистральной продольной трещины в зоне линии сплавления. Трещина на трубе образовалась при окружной деформации, не превышающей 11,5%, что существенно ниже разрушающей деформации основного металла трубы. Длина трещины вдоль линии сплавления составила 1,13 м и разрушение материала проходило за счет отрыва, т.е. хрупко (рис. 2).



Рис. 2

Таким образом, в проведенных исследованиях подтверждена близость механизмов деформирования и разрушения материала труб, выявленных при скоростях деформации $\sim 10^1$ – 10^2 с⁻¹, к квазистатическим испытаниям (о чем говорится, например, в [1]), на основании результатов которых делается заключение о прочности труб для МГ. Следовательно, наряду с существующими методами оценки стойкости газовых труб к разрушению возможно применение и техники взрывного эксперимента для данных исследований.

Применение метода взрывного нагружения позволило выявить «аномальное» разрушение образца двухшовной трубы, в зоне линии сплавления, имеющей пониженную пластичность и трещиностойкость.

Проведенная серия взрывных экспериментов продемонстрировала возможности метода взрывного испытания для определения стойкости к разрушению труб с продольными сварными швами при достижении больших пластических деформаций.

Полученные экспериментальные данные применялись для верификации численных кодов, моделирующих динамическую реакцию и разрушение труб при больших пластических деформациях.

На рис. 3 показано распределение интенсивности деформации на поверхности трубы при численном моделировании разрушения по линии сплавления с использованием программных кодов ДИАДА-2D (расчет газодинамической нагрузки) [2] и DRACON (расчет деформирования конструкции) [3].

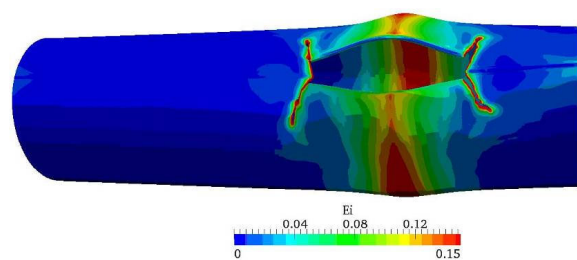


Рис. 3

Работа выполнена в соавторстве с М.А. Сыруниным в рамках договора с ОАО «Газпром».

Список литературы

1. Взрывные технологии: Уч. для вузов / Под ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
2. Величко О.М. и др. Пакеты программ для решения многомерных задач газовой динамики разностным методом С.К. Годунова // Современные методы проектирования и обработки ракетно-артиллерийского воо-

ружения: Сб. докл. научн. конф. Волжского регионального центра РАН. 2000.

3. Абакумов А.И., Низовцев П.Н., Певницкий А.В., Соловьев В.П. Программный комплекс DRACON для расчета упругопластических течений при ударно-волновом нагружении в двумерном и трехмерном приближении // Междунар. конф. IV Забалахинские научные чтения: Тез. докл. Снежинск, октябрь, 1995. С. 89–90.

RESEARCH OF THE STRENGTH OF LARGE-DIAMETER GAS PIPES UNDER EXPLOSIVE LOADING*A.P. Tsoi, V.Yu. Mel'tsas*

The authors investigated the structural strength of electric-welded straight-line-seam gas pipes with the outside under internal explosive loading. A pipe is considered to be a structure which consists of the basic metal of the pipe, welded seams, lines of alloying of the basic metal and the welded seams. Three schemes leading to failure of pipes, formation of the main crack through the thickness, were tested. Peculiarities of the pipe response were revealed during the tests for each loading scheme. A list of the measuring techniques was formulated for providing informativity of the tests. In the tests according to the scheme of multiple loading of the pipe sample with gradual growth of HE charge power, the authors determined the value of circular plastic strain when the basic metal of the pipes failed. The failure had a viscous character and was followed by high plastic strains. In the tests according to the scheme of single loading by a destroying HE charge, «anomalous» failure of the pipe sample occurred at a circular strain average in the cross-section which was much lower than the critical value for the basic metal. A brittle crack passed along the alloying line, i.e. reduction of plasticity and crack-resistance of the alloying line zone took place. The obtained experimental data were used for the verification of numerical codes simulating dynamic reaction and failure of pipes under high plastic strains. The performed experimental researches demonstrated possibilities of the method of explosive testing in determining failure resistance of gas pipes when reaching high plastic strains.

Keywords: electric-welded straight-line-seam gas pipe, explosive loading, HE charge, main crack.