

УДК 621.791:621.643

**Метод ускоренных сравнительных испытаний на трещиностойкость сварного соединения и основного металла сварных труб**

Л.М. Выбойщик, канд. тех. наук, ООО фирма "Самараконтрольсервис" г. Тольятти

Н.Л. Сопин, эксперт, ООО фирма «Самараконтрольсервис», г. Самара

М.И. Колосовский, эксперт, ООО фирма «Самараконтрольсервис», г. Новый Уренгой

Е.И.Ермольчик, главный инженер, Красноярский филиал ФГУП ВО «Безопасность», г.Красноярск

А.С.Абуздин, ведущий инженер, Красноярский филиал ФГУП ВО «Безопасность», г.Красноярск

**Аннотация**

В настоящее время в нефтедобывающей промышленности широко используются сварные трубы, полученные высокочастотной сваркой (ВЧС). От традиционных горячекатаных труб их отличает низкая себестоимость, размерная стабильность, возможность изготавливать трубы различного размера и более высокие свойства основного металла. Однако получение высоких механических и коррозионных свойств сварных соединений (желательно на уровне основного металла) является наиболее трудной задачей сварочного производства.

Ключевые слова: высокочастотная сварка, нефтепромысловые трубы, механические и коррозионные свойства, стойкость металла под напряжением.

Для нефтепромысловых труб основным фактором повреждения является коррозионно-механическое разрушение, наиболее часто проявляющееся в сварных соединениях, соответственно сопротивление образованию и распространению трещин в агрессивных нефтедобываемых средах определяет работоспособность промышленного оборудования. Требуется постоянный и надежный контроль коррозионной стойкости используемых труб, а именно разработка новых более простых и надежных методов сравнительной оценки трещиностойкости сварных соединений и основного металла сварных конструкций.

В настоящее время оценку коррозионной стойкости металла под напряжением проводят на специально вырезанных образцах по двум известным методикам:

- испытания в установке «Cortest», на цилиндрических образцах с определением порогового напряжения [1];

- испытания на специальных образцах типа двойной консольной балки (ДКБ) с искусственно выращенной трещиной, которые после выдержки в расклиненном состоянии в коррозионной среде, разрывают на испытательной машине с определением коэффициента концентрации напряжений в вершине трещины ( $K_{I_{SSC}}$ ) [2].

Обе эти методики трудно применимы для сварных соединений малой ширины, характерных при ВЧС. Для испытаний на установке «Cortest» это обусловлено следующими причинами:

- образцы, вырезанные вдоль сварного шва, не всегда соответствуют центру сварного соединения, а в поперечных образцах разрушение часто не происходит по сварному соединению, из-за механической и структурной неоднородности образцов.

- дополнительные технологические остаточные напряжения, формирующиеся при обработке поверхности образца резанием, вызывают искажения кристаллической решетки, структурные и фазовые изменения в поверхностном объеме материала, что может привести к некорректным выводам о коррозионно-механической прочности материала труб;

- ориентированная шероховатость механически обработанной поверхности образца, являясь концентратором, также вызывает появление дополнительных остаточных напряжений по нормали к поверхности образца;

- одноосное механическое растяжение не позволяет воспроизвести в материале цилиндрических образцов характеристик плоского напряженного состояния, существующего при эксплуатации труб;

- методика испытаний не позволяет оценить влияния анизотропии прокатки на коррозионную стойкость материала труб, возможного при эксплуатации.

Для ДКБ - образцов надрез и искусственно выращенную трещину трудно расположить в центре или определенной зоне сварного соединения, полученного ВЧС. Кроме того, отсутствие в стандартах требований оценки скорости роста трещины, значительная текучесть металла у вершины трещины и возможное ее ветвление при предельной нагрузке приводят к некорректным, и ненадежным значениям  $K_{I_{SSC}}$ .

Для более точного воспроизведения условий эксплуатации исследуемых сварных труб нами предложена усовершенствованная методика испытаний С-образных образцов на коррозию под напряжением.

Для С-образных образцов в большей мере воспроизводится характер двухосного напряженного состояния, соответствующего эксплуатации труб, работающих при внутреннем давлении. На таких образцах также возможно более точное определение

уровня напряжений и момента разрушения сварных соединений при данной величине нагрузки. Метод испытания на коррозионное растрескивание алюминиевых и магниевых сплавов на С-образных образцах предусмотрен ГОСТом 9.019-74 [3], стандарты которого по выбору размеров образцов, расчету напряжений и деформации образца и обработки результатов испытаний, используются в нашем способе.

Выбор геометрических размеров образцов определяется характером распределения напряжений. При назначении ширины кольцевых образцов исходили из условия постоянства напряженного состояния во всех точках образца. При ширине  $b \geq (6 - 8)h$  в середине образца формируется плоско-деформированное состояние.

По данным [4] продольные напряжения, соответствующие переходу стали в стадию текучести, для широкой изгибаемой полосы на 13% выше, чем узкой полосы и испытания на изгиб широких образцов по сравнению с узкими являются более жесткими. Так для испытаний труб  $\varnothing 219$  мм и толщиной стенки  $h=8$  из стали 13ХФА выбрана ширина образца  $b = 50$  мм, что соответствует напряженному состоянию широкой полосы ( $b \geq 6h$ ). Напряженное состояние в С-образных образцах формируется путем сжатия по центральной оси кольца (рис.1).

Напряжения от действия изгибающего момента

$$\sigma_{II} = \frac{M}{S} \cdot \frac{z_i}{p_i} = \frac{M}{S} \alpha_i, \quad (1)$$

где  $M = PR_0$  - изгибающий момент в сечении АВ (см. рис.1 и 2);  $R_0 = R + 0,5h$  - радиус кривизны оси образца;  $S = F \cdot z_0$  - статический момент сечения относительно нейтральной оси CD при изгибе моментом  $M$ ;  $F$  - площадь поперечного сечения образца;  $z_0 = R_0 - r$  - расстояние от главной оси  $y_0$  до нейтральной оси CD;  $r$  - радиус кривизны нейтрального слоя;  $z_i$  - координаты точек, отсчитываемых от нейтральной оси CD;  $p_i$  - координаты тех же точек, отсчитываемых от центра кривизны.

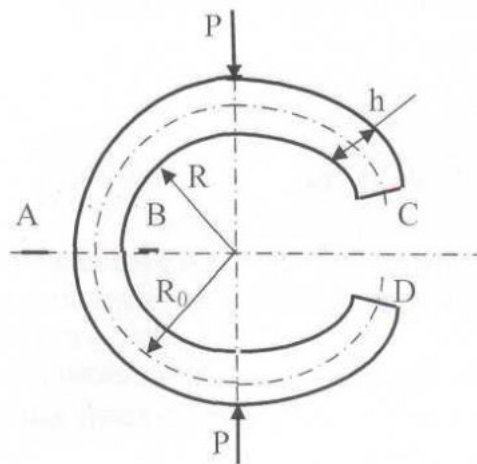


Рис.1. Осевое нагружение образца

Эпюра распределения нормальных напряжений по линиям 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5 и 6-6 по высоте сечения АВ образца приведена на рис. 2.

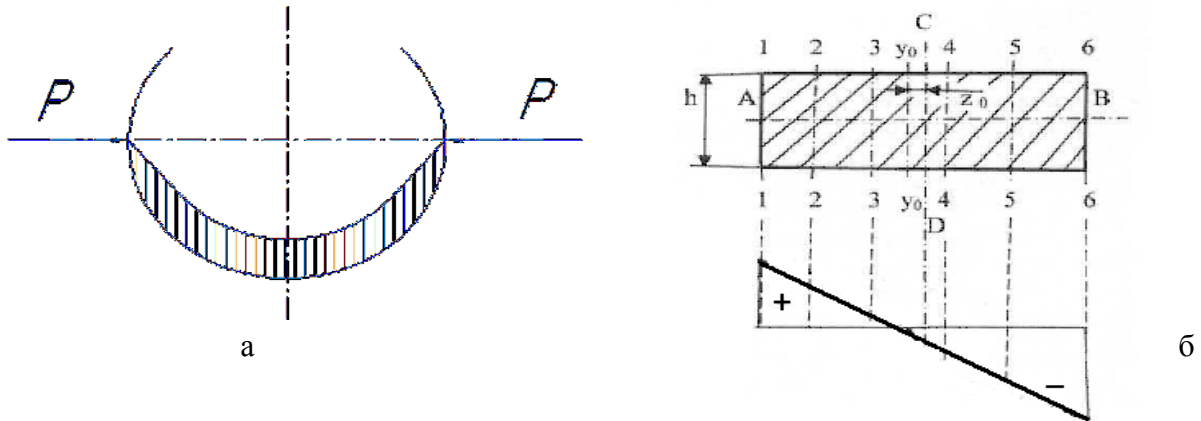


Рис. 2. Изменение напряжений по образующей (а) и сечению (б) образца.

Расчетное напряжение в кольцевом образце, вырезанном из трубы, определяли по величине деформации  $f$  по методике [3] (рис 1):

$$f = \frac{D_{CP}^2 \cdot \pi \cdot \sigma}{4E \cdot h \cdot Z}, \quad (2)$$

где  $D_{CP}$ - средний диаметр кольца, мм;  $D_{CP} = D - h$ ;  $D$ - наружный диаметр трубы, мм;  $h$ - толщина стенки трубы, мм;  $E$ - модуль упругости, кгс/мм<sup>2</sup> и  $Z$ - поправочный коэффициент, который для нашего образца ( $D/h=27,3$ ) составляет 0,975.

Тарировочный график зависимости максимального напряжения на поверхности С-образного образца шириной  $b = 50$  мм, вырезанного из сварной трубу  $\varnothing 219 \times 8$  мм из стали 13ХФА от величины деформации  $f$ , измеряемой по диаметру центральной оси образца приведен на рис.3. Проведенный более точный расчет с учетом изменения геометрии образца при сжатии дал поправочный коэффициент 1,002 для значений напряжений, что находится в пределах погрешности.

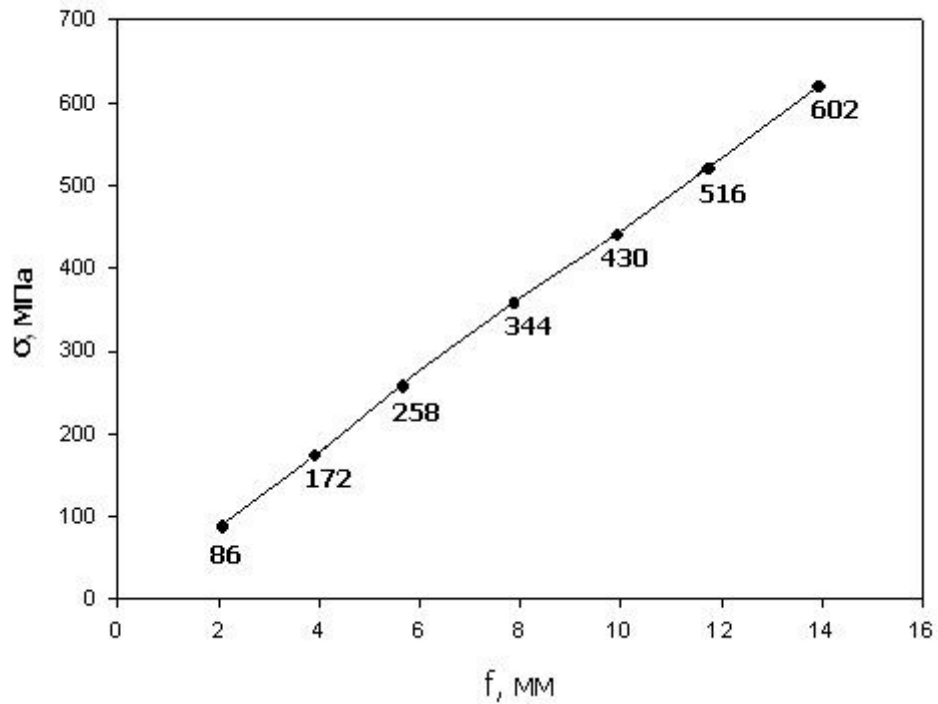


Рис.3. Изменение максимальных напряжений на поверхности С-образного образца ( $b=50$  мм), вырезанного из трубы  $\text{Ø}219 \times 8$  мм от величины деформации.

Для испытаний на коррозионное растрескивание на наружную поверхность С-образных образцов наносили полуэллиптический надрез, Схема нанесения надреза и вид надреза показаны на рис 4.

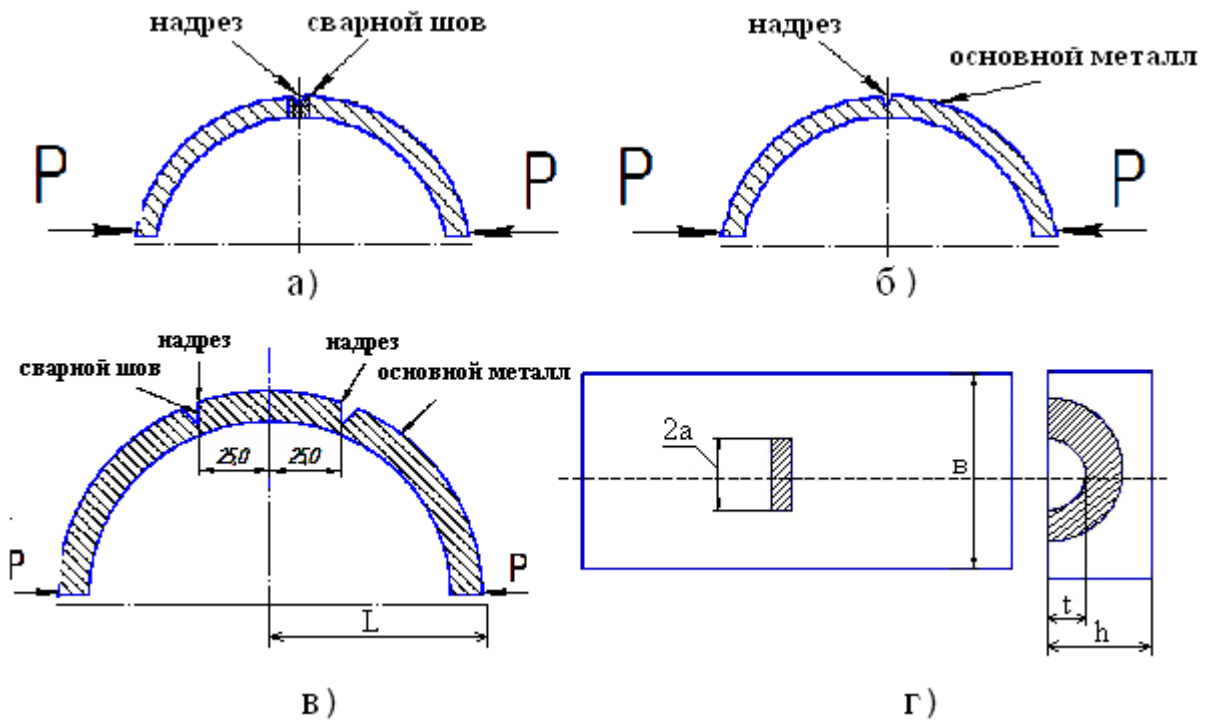


Рис.4. Варианты нанесения надрезов в сварных трубах:

а – надрез по сварному соединению; б – надрез по основному металлу;  
 в – два надреза на одном образце (по сварному шву и основному металлу); г – вид надреза.

Рекомендуется использовать две схемы нанесения надрезов: одиночный надрез на образце в области максимальных напряжений вдоль сварного соединения или основного металла (рис. 4 а и б); два надреза на одном образце: по сварному шву и основному металлу, расположенных симметрично относительно оси симметрии образца ступенчато относительно друг друга рис. 4. в). Использование двух надрезов на одном образце позволяет получить как сами значения трещиностойкости, а в большей мере соответствие трещиностойкости сварного соединения основному металлу, что важно как показатель уровня производства.

Геометрические характеристики надреза для обеспечения плоской деформации выбирали в соответствии с существующими рекомендациями:

$$l \geq 2,5C; \quad (3)$$

$$h \geq 2,5C;$$

$$0,1 < \left( \xi = \frac{l}{b} \right) < 0,75;$$

$$\text{где } c = \left( \frac{K_{1C}}{\sigma_T} \right)^2 - 2a \leq \frac{2h}{3}, \text{ поправка, учитывающая пластические}$$

деформации.

Для нашего образца (b=50 мм и h=8 мм.) приняты размеры надреза надреза: (l = 3мм, 2a = 15 мм) вполне удовлетворяющие рекомендациям (3).

Испытания на трещиностойкость проводятся в следующей последовательности:

1. С-образные образцы с одним или двумя надрезами стягиваются шпильками для получения на поверхности в зоне надрезов определенных растягивающих напряжений  $\sigma$  (пропорциональных пределу текучести: 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 и 0,85 от  $\sigma_{0,2}$ ). Нами при работе с коррозионностойкими сталями обычно используется напряжения  $\sigma = 0,8 \sigma_{0,2}$

2. Часть образцов в напряженном состоянии выдерживали на воздухе для получения сравнительных исходных характеристик, а остальные образцы помещали на 96 часов в коррозионную среду по стандарту NACE TM 0264-86 (водный раствор 0,5%  $\text{CH}_3\text{COOH} + 5\% \text{NaCl} + \text{H}_2\text{S}$  насыщен.; pH 3,5-3,8).

3. Образцы, не разрушившиеся при коррозионных испытаниях подвергали сплющиванию на испытательной машине (рис.5) с записью диаграммы сплющивания и

регистрацией параметров акустической эмиссии, по которым оценивали напряжения, соответствующие началу развития трещины (надреза).

Результаты испытаний представляются в виде значений коэффициента концентрации напряжений в вершине трещины (надреза)  $K_{1SS}$  для основного металла и сварного соединения каждой из исследуемых труб. Более подробная процедура испытаний приведена в патенте [6].

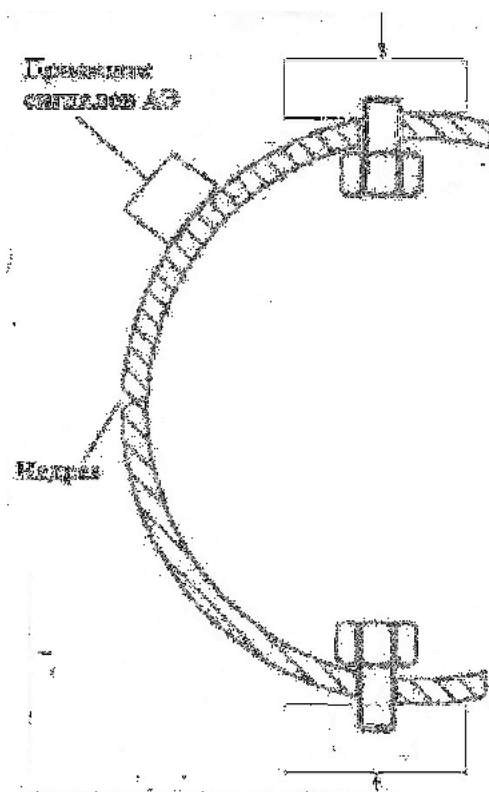


Рис. 5. Схема образцов на

сплющивания разрывной машине

Описанный метод сравнительной оценки коррозионной стойкости под напряжением сварных соединений и основного металла успешно использован в ряде исследований. По нашему мнению он может быть рекомендован для сдаточных испытаний и оценки качества сварных труб, предназначенных для работы в месторождениях с высокой агрессивностью добываемых нефтяных сред.

## Литература

1. Стандарт NACE TM 0177, Метод А
2. Стандарт NACE TM 0177, Методы С и D
3. Стандарт ГОСТ 9.019.74 (ИСО 9591-89) Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание
4. Быков В.А. Пластичность, прочность и разрушение судостроительных материалов / В.А. Быков – Л., Судостроение, 1974.
5. Стеклов О.И. Прочность конструкций в агрессивных средах / О.И. Стеклов - М.: Машиностроение, 1976. - 200с.
6. Патент РФ № 2.368.888 Способ испытания труб на коррозионную стойкость / Лучкин Р.С., Выбойщик М.А., Выбойщик Л.М., Платонов С.Ю.; заявка от 23.03.2008; опубликован 27.09.2009, бюллетень № 27.