

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ

Родионов А.К., Бабенко Ф.И.

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск
e-mail: yuristan@yandex.ru*

В работе приводятся результаты испытаний модельных образцов сварных соединений полиэтиленовых труб с надрезами, выполненными в характерных зонах сварных стыковых соединений (ССС). Расчетно-экспериментальным путем, включая данные фрактографических исследований изломов образцов, с позиции механики разрушения определены условные значения показателей трещиностойкости и предела текучести материала в соответствующих зонах СССР. Указанные параметры предлагается использовать как определяющие для сравнительной оценки качества (надежности) СССР полиэтиленовых труб.

Ключевые слова: *сварное стыковое соединение, полиэтиленовые трубы, коэффициент интенсивности напряжений, предел текучести*

Введение

В настоящее время проблемы с оценкой качества полиэтиленовых (ПЭ) труб, применяемых при строительстве газопроводов, практически не существует. Основным показателем считается длительная прочность материала трубы, которая определяется в ускоренных экспериментах при повышенной температуре испытаний [1]. Иначе обстоит дело с оценкой качества сварных стыковых соединений (ССС) ПЭ труб. Согласно действующему СНиП (СП 42-103-2003), методы контроля качества СССР подразделяются на обязательные (экспресс методы) и специальные.

Основной из четырех экспресс-методов контроля качества СССР – испытание образца-лопатки (вырезанной из сварного соединения – модельный «шовный» образец СССР) на осевое растяжение. Критерием определения качества СССР является характер разрушения образца: недопустим разрыв по плоскости сварки, при этом не менее 80 % образцов должны разрушиться по основному материалу (линия разрыва не пересекает плоскость сварки). Таким образом, основной из существующих экспресс-методов контроля следует признать сугубо качественным и, очевидно, малоинформативным с точки зрения его использования при корректировке технологических режимов проведения сварочных работ. Принципиальная

трудность задачи состоит в том, что образец необходимо разрушить в области ССС, тогда как в испытаниях на кратковременную прочность образец разрушается вне этой области.

Основной из четырех специальных методов контроля качества ССС – испытание на длительное растяжение при повышенной температуре, в среде смачивающего поверхностно-активного вещества. При этом необходимо отметить практически полное отсутствие в литературе экспериментальных данных по длительной прочности ССС в ускоренных экспериментах при повышенных температурах в обычных средах (воздух, вода), не содержащих искусственно вводимые поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Постановка задачи

1. Произвести сравнительную экспериментальную оценку долговечности (длительной прочности) модельных образцов ССС и основного материала ПЭ труб в воздушной среде (без применения ПАВ).

2. Произвести расчетно-экспериментальную оценку характеристик вязкости разрушения модельных образцов ССС.

Методы испытаний

1. В эксперименте на долговечность (длительную прочность при растяжении) использовались образцы – лопатки тип 5 по ГОСТ 11262-80, которые вырубались из труб ПЭ63 («гладкие» образцы). Причем в случае испытаний сварных соединений образцы вырубались из труб, имеющих сварное соединение, так, что сварной шов находился посередине образца-лопатки («шовные» образцы). Испытывались «гладкие» и «шовные» (со снятым гратом) образцы. Температура испытаний 80° С. Нагрузка соответствовала: $\sigma_1 \sim 3,7$ МПа (39,3 %), $\sigma_2 \sim 2,9$ МПа (30,7 %), $\sigma_3 \sim 2,2$ МПа (23,3 %), в процентах от предела текучести трубного материала $\sigma_T(80^\circ \text{C}) \approx 9,5$ МПа.

2. В экспериментах на вязкость разрушения использовались образцы в форме полосок (6,56x16,4x120 мм) с краевой поперечной трещиной при одноосном растяжении, вырезанные из труб ПЭ63 и ПЭ80. ССС со снятым гратом находилось в средней части рабочей зоны полоски. Надрезы глубиной 5,75 мм наносили

ножовочным полотном и заостряли лезвием бритвы, согласно методике [2]. Изменения на поверхностях изломов образцов проводились по микрофотографическим изображениям. Кратковременные испытания на растяжение проводились при температуре 213 К и скорости движения траверсы машины 100 мм/мин (ПЭ63, ПЭ80) и 500 мм/мин (ПЭ63). При определении пределов текучести материалов σ_T использовали стандартные образцы-лопатки тип 2, ГОСТ 11262-80.

Результаты экспериментов

1. Сравнительная оценка долговечности модельных образцов ССС и трубного материала ПЭ63

В табл. 1 и на рис. 1 и 2 представлены результаты ускоренных (80 °С) испытаний на длительную прочность.

Таблица 1

Количество и характер разрушения образцов в испытаниях на длительную прочность при растяжении

| Уровни σ , МПа | Количество выставленных образцов | | Разрушение шовных | |
|-----------------------|----------------------------------|--------|-------------------|---------------------------|
| | Гладкие | шовные | по шву | шов $> 5 \cdot 10^{-3}$ м |
| 3,72 | 8 | 5 | 2 | 3 |
| 2,9 | 6 | 5 | 2 | 3 |
| 2,2 | 4 | 5 | 4 | 1 |

* *Примечание:* «шов $> 5 \cdot 10^{-3}$ м» обозначает образцы, разрушение которых локализовано на длине рабочей части образца (ГОСТ 11262-80 тип 5) на расстоянии, превышающем $5 \cdot 10^{-3}$ м от линии сплавления ССС.

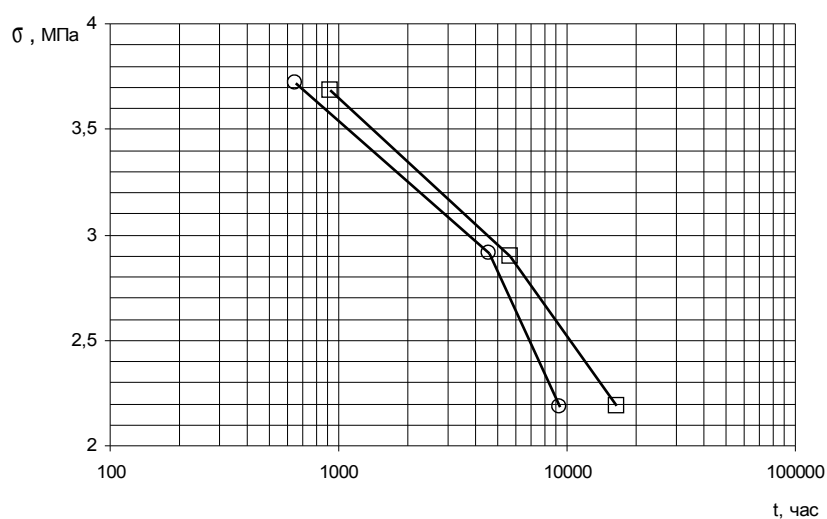


Рисунок 1. Средние значения показателей длительной прочности «гладких»(□) и «шовных» (○) образцов.

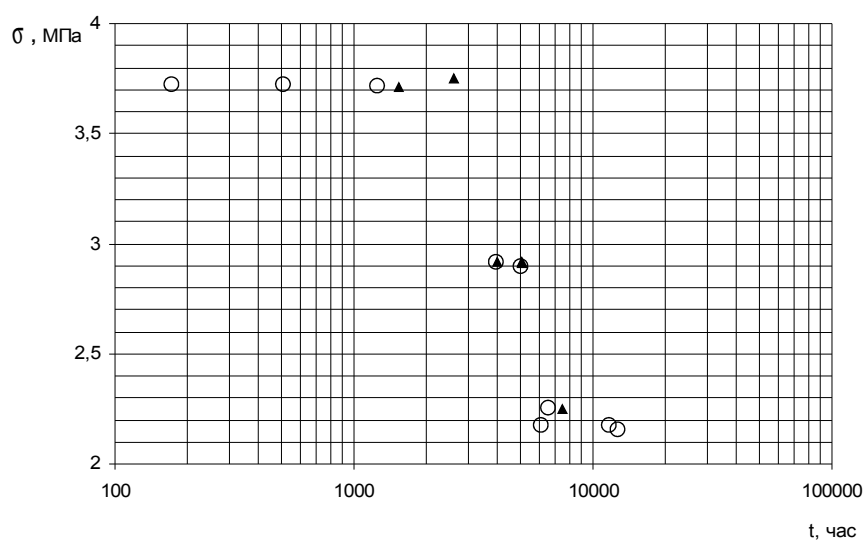


Рис. 2. Длительная прочность «шовных» образцов: (○) - разрушение в зоне сплавления, (▲) – разрушение в основном материале.

Доля образцов, разрушившихся по шву, в зависимости от уровня нагружения, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Доля образцов, разрушившихся по шву, %

| σ_1 | σ_2 | σ_3 |
|------------|------------|------------|
| 40 % | 40 % | 80 % |

Уменьшение долговечности образцов, разрушившихся по сварному соединению, по отношению к гладким образцам составляет:

Таблица 3.

Разница значений долговечности между гладкими и шовными образцами, %.

| σ | σ_1 | σ_2 | σ_3 |
|------------|------------|------------|------------|
| Δt | 24 | 20 | 32 |

При этом наблюдаемые разрывы образцов локализованы либо по плоскости сварного соединения (линия сплавления ССС), либо в области основного материала образца, но не ближе $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ м от плоскости сварного соединения. Ука-

занное обстоятельство является следствием неоднородной структуры ССС, которая состоит из нескольких зон: зоны сплавления ($Z_{п}$), зоны термического влияния ($Z_{т}$), и зоны основного материала ($Z > Z_{т}$).

Были определены размеры (протяженность, см. рис. 3) характерных зон ССС: граница зоны сплавления $Z_{п}$ – определялась по микрофотографии поперечного излома «шовного» окружного сегмента, разрушенного после охлаждения в среде жидкого азота $\sim 1,2 \cdot 10^{-4}$ м, граница зоны термического влияния $Z_{т}$ определялась с помощью тепловизора в момент формирования ССС $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ м. Она производилась по следующей схеме. На рис. 3 представлена кривая зависимости: «температура в области сварного соединения – расстояние от плоскости сварки», полученная в наших экспериментах при помощи тепловизора в начальный момент формирования ССС. Линия параллельная оси абсцисс на рисунке, соответствующая 80°C , «отсекает» на температурной зависимости область температур нагрева соединения где $T > 80^{\circ}\text{C}$ (зона термического влияния), при этом пространственная длина данного участка составляет – $5 \cdot 10^{-3}$ м.

Причину отмеченной локализации разрывов «шовных» образцов в испытаниях на длительную прочность (см. рис. 2) очевидно, следует искать в различии, в том числе и механических, показателей свойств материала в соответствующих зонах ССС. Как было отмечено выше, принципиальная сложность задачи, ограничивающая возможности существующих методов кратковременных механических испытаний состоит в том, что образец необходимо разрушить в соответствующей характерной области ССС. В испытаниях на кратковременную прочность шовные образцы, за редким исключением, разрушаются по основному материалу. В указанной связи были испытаны образцы ССС с острым надрезом в зонах сплавления и основного материала, с целью определения характеристик вязкости разрушения. Результаты были интерпретированы с позиции механики разрушения.

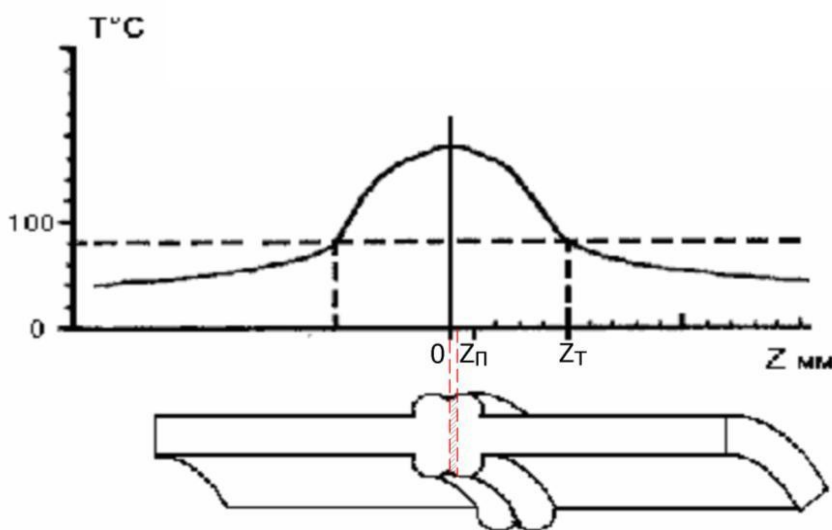
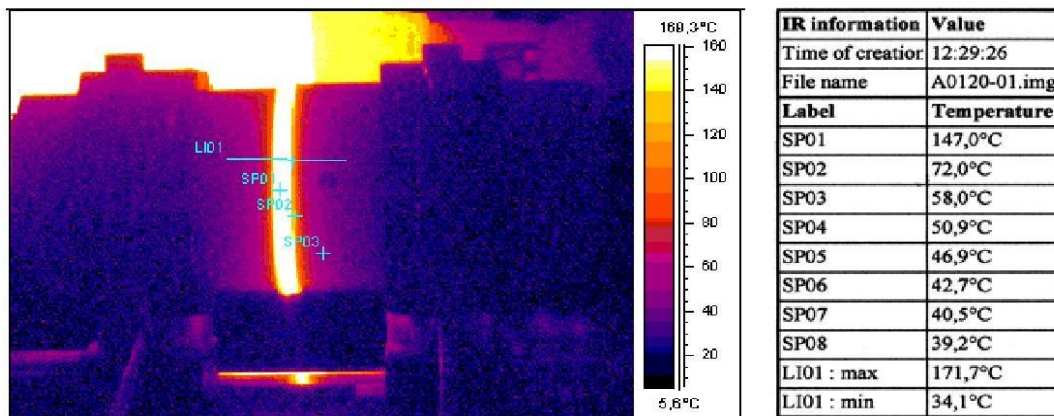


Рисунок 3. Картина температурного поля в начальный момент формирования сварного стыкового соединения, обозначения в тексте

2. Расчетно-экспериментальная оценка показателей трещиностойкости трубных материалов ПЭ63 и ПЭ80

2.1. В качестве характеристики вязкости разрушения (трещиностойкости) использовали величину условного критического коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при одноосном растяжении – K_{IC} . Вычисления проводили по соотношению [3]:

$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi l} \cdot \xi(l/b), \quad (1)$$

где σ – разрушающее напряжение образца с надрезом, l – длина (глубина) надреза, b – полуширина образца, $\xi(l/b)$ – табулированная функция.

В табл. 4 приведены расчетно-экспериментальные значения K_{IC} (условный) для образцов полосок в 2-х зонах ССС. Эксперименты проведены при $T = -60$ °С по 5 образцам на точку.

Таблица 4

Расчетно-экспериментальные значения характеристик вязкости разрушения испытанных образцов

| V мм/мин | ПЭ63 | | | | |
|---------------|----------------------------------|------|----------|------------------|-------|
| | K_{IC} (МПа·м ^{1/2}) | | L (мм) | σ_T (МПа) | |
| | О | Ш | О | О | Ш |
| 100 | 5,81 | 4,39 | 33,46 | 50,22 | 53,47 |
| 500 | 5,04 | 3,80 | 22,51 | 53,11 | 59,39 |
| | ПЭ80 | | | | |
| 100 | 5,78 | 4,35 | 37,94 | 46,92 | 50,20 |

* аббревиатуры «О» и «Ш» обозначают принадлежность указанной величины к зоне основного материала и зоне сплавления, соответственно.

Термин «условный» обозначает невыполнение необходимых требований линейной механики разрушения в условиях эксперимента:

$$l, 2b-l, h > L = 2,5 \left(\frac{K_{IC o}}{\sigma_{T o}} \right)^2, \quad (2)$$

где $h = 6,56 \cdot 10^{-3}$ м – толщина образца-полоски;

$l = 5,75 \cdot 10^{-3}$ м, $b = 8,2 \cdot 10^{-3}$ м.

Значение величины L приведены в таблице 4.

Таким образом, в нашем случае в качестве количественной меры сопротивления материала распространению трещины целесообразно использовать предел трещиностойкости – I_C , определенный как условный критический КИН по соотношению (1) [4].

2.2. В рамках разрабатываемой методики [5, 6] была произведена оценка пределов текучести ССС трубных материалов ПЭ63 и ПЭ80 в зоне сплавления. На рис. 4 приведены микрофотографии поверхностей разрушения модельных образцов-полосок ССС с надрезом в зонах основного материала (а) и сплавления (б). Возникновение трехосного напряженного состояния (гидростатического растяжения) в области надреза проявляется на фотографиях в том, что край зоны пластичности втягивается внутрь образца и разрушение начинается внутри материала образца. Из рисунка видно, что у края достаточно развитой зоны пластичности возникает трещина в направлении, перпендикулярном оси растяжения. Вокруг области инициирования разрушения находится плоская область быстрого прорастания

трещины. Отметим, что в нашем случае – кристаллический полимер ПЭ, пластическая деформация у вершины надреза развивается неоднородно, вследствие существенной неоднородности исходной структуры материала [7].

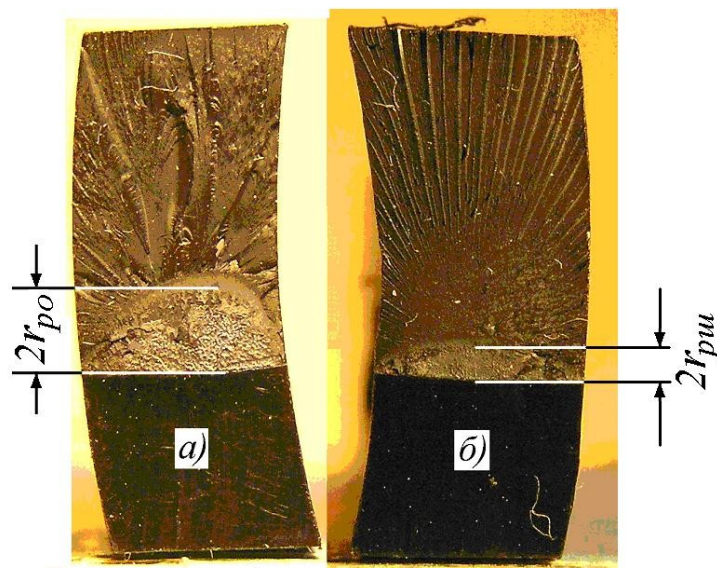


Рисунок 4. Микрофотографии поверхностей разрушения надрезанных образцов-полосок ССС материала ПЭ63 ($T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V=500\text{ мм/мин}$) в зоне основного материала(а) и в зоне сплавления (б), другие обозначения в тексте

Расчетно-экспериментальная оценка размера пластической зоны в вершине трещины модельных образцов ССС ($2r_{\text{ши}}$) производилась по следующей схеме.

Полагая [5], что

$$r_p \sim C \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_T} \right)^2, \quad (3)$$

где r_p – радиус пластической зоны, C – постоянный коэффициент, зависящий от вида напряженного состояния:

$C(\text{ПНС}) = 1/2\pi$ – для условий плоского напряженного состояния;

$C(\text{ПДС}) = 1/6\pi$ – для условий плоского деформированного состояния.

Получаем:

$$\frac{r_{po}}{r_{\text{ши}}} \sim \left(\frac{K_{ICo}}{K_{ICш}} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{Tш}}{\sigma_{To}} \right)^2, \quad (4)$$

где r_{po} , $r_{\text{ши}}$ – радиус пластической зоны в вершине трещины модельного «гладкого» и «шовного» образца, соответственно.

Откуда:

$$\sigma_{Tш} = \sqrt{\frac{r_{po}}{r_{пш}} \cdot \frac{K_{ICш}}{K_{ICo}} \cdot \sigma_{To}}, \quad (5)$$

где $\sigma_{Tш}$ – условный предел текучести в зоне сплавления ССС.

В табл. 5 приведены измеренные (см. рис. 4) и расчетные (по соотношению (3)) значения размеров зон пластичности. Приведены средние значения показателей.

Таблица 5

Расчетно-экспериментальные значения линейных размеров пластических зон
(измеренных и рассчитанных) модельных образцов

| | $2r_{po}$, (мм) измеренный | $2r_{пш}$, (мм) измеренный | $2r_{po}$, (мм) расчет (ПНС) | $2r_{po}$, (мм) расчет (ПДС) |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ПЭ63 (V=100 мм/мин) | 4,17 | 2,10 | 4,26 | 1,42 |
| ПЭ63 (V=500 мм/мин) | 2,64 | 1,20 | 2,87 | 0,96 |
| ПЭ80 (V=100 мм/мин) | 4,77 | 2,36 | 4,83 | 1,61 |

Из табл. 5 видно что размеры зон пластичности ($2r_p$), как основного материала так и зон сплавления, уменьшаются при повышении скорости испытания.

Подставляя в (5) численные значения величин из табл. 4, 5, получаем:

– для ПЭ63 при скорости 100 мм/мин

$$\sigma_{Tш} = \sqrt{\frac{4,17}{2,10}} \cdot 0,756 \cdot 50,22 \approx 53,47 \text{ (МПа)}, \text{ т.е. } \sigma_{Tш} \approx 1,065 \cdot \sigma_{To};$$

– для ПЭ63 при скорости 500 мм/мин

$$\sigma_{Tш} = \sqrt{\frac{2,64}{1,20}} \cdot 0,754 \cdot 53,39 \approx 59,39 \text{ (МПа)}, \text{ т.е. } \sigma_{Tш} \approx 1,118 \cdot \sigma_{To};$$

– для ПЭ80 при скорости 100 мм/мин

$$\sigma_{Tш} = \sqrt{\frac{4,77}{2,36}} \cdot 0,753 \cdot 46,92 \approx 50,20 \text{ (МПа)}, \text{ т.е. } \sigma_{Tш} \approx 1,070 \cdot \sigma_{To}.$$

Отметим, что как следует из данных табл. 5, измеренные средние значения $2r_{po}$ располагаются строго «между» соответствующими расчетными значениями $2r_{po}$ (ПДС) и $2r_{po}$ (ПНС):

$$1,42 \cdot 10^{-3} \text{ м} < 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ м} < 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ м} \text{ (для ПЭ63, при скорости 100 мм/мин);}$$

$$0,96 \cdot 10^{-3} \text{ м} < 2,64 \cdot 10^{-3} \text{ м} < 2,87 \cdot 10^{-3} \text{ м} \text{ (для ПЭ63, при скорости 500 мм/мин);}$$

$$1,61 \cdot 10^{-3} \text{ м} < 4,77 \cdot 10^{-3} \text{ м} < 4,83 \cdot 10^{-3} \text{ м} \text{ (для ПЭ80, при скорости 100 мм/мин).}$$

Указанное обстоятельство является существенным аргументом в пользу корректности предлагаемой процедуры оценки показателя $\sigma_{Tш}$.

Выводы

Расчетно-экспериментальным путем, с позиции механики разрушения определены условные значения показателей трещиностойкости и предела текучести трубных материалов ПЭ63 и ПЭ80 в зоне сплавления ССС и в основном материале трубы. Указанные параметры предлагается использовать как определяющие для сравнительной оценки качества (надежности) ССС полиэтиленовых труб.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований №09-08-98515-р-восток-а.

Литература

1. ГОСТ 24157-80. Трубы из пластмасс. Метод определения стойкости при постоянном внутреннем давлении.
2. ASTM D 5045-99 (2007). Standard test methods for plane-strain fracture toughness and strain energy release rate of plastic materials.
3. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. –М.: Наука, 1974. 640 с.
4. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения на базе компьютерных технологий. Практикум. – СПб.: БХВ - Петербург, 2007. 464 с
5. Бабенко Ф.И., Родионов А.К. Эксплуатационная надежность полиэтиленовых трубопроводов в холодном климате // Материалы, технологии, инструменты. 2007. –Т.12. –№4. – С. 21-24.
6. Бабенко Ф.И., Родионов А.К. Оценка надежности сварного стыкового соединения полиэтиленовых труб с позиции механики разрушения // Материалы, технологии, инструменты. – 2009. –Т.14. –№4. – С. 5-8.
7. Нарисава И. Прочность полимерных материалов.: М., Химия, 1987. – 400 с.