

УДК 678.

ПЛАСТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ В ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБАХ С РАЗЛИЧНЫМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.Г. КОЛБАЯ¹, В.В. КОВРИГА²⁺

¹ ООО «Климовский трубный завод», Климовск, Россия;

² ООО «Группа ПОЛИМЕРТЕПЛО», Очаковское шоссе, 18, стр. 3, 119530, Москва, Россия.

В работе предложено использовать для оценки пластического разрушения полиэтиленовых труб газопроводов параметр естественной кратности вытяжки (ЕКВ), широко используемый в работах по химическим волокнам. Характер изменения ЕКВ изучен при одноосном и двуосном нагружении. Показано, что в обоих случаях наблюдается идентичная картина пластического разрушения. Оценены величины ЕКВ. Для трубных материалов показано, что параметр ЕКВ существенно меняется при переходе от одной марки трубного полиэтилена к другой.

Ключевые слова: полиэтиленовые трубы, пластическое разрушение, естественная кратность вытяжки (ЕКВ)

Введение

Проблемы прогнозирования рабочего ресурса полиэтиленовых газопроводов широко изучаются в различных аспектах. Так в 2007 году были проведены детальные исследования физико-химических свойств образцов полиэтиленового газопровода, находившегося в эксплуатации 38 лет [1]. В 2014 году проведена работа, в ходе которой изучены физико-механические и физико-химические свойства 56 образцов полиэтиленовых газовых труб из действующих газопроводов со сроком эксплуатации от 4 до 47 лет.

Проведены испытания на трубных образцах, включая гидравлические испытания, определены индукционный период окисления, степень кристалличности, наличие стабилизатора, сопротивление раздиру в различных слоях стенки образца, свариваемость, предел текучести. Было показано, что наиболее полно рабочий ресурс оценивается по сохранению пластичности [2].

Цель работы – изучить возможности использования показателя естественной кратности вытяжки, подробно описанного Э.М. Айзенштейном [3] и В.Э. Геллером [4] в работах по вытяжке волокон для описания картины пластического разрушения полиэтиленовых труб при одноосном и двуосном нагружении в процессе гидравлических испытаний.

Материалы и методы исследования

Методика гидравлических испытаний. Использовали образцы труб длиной не менее трёх диаметров трубы [5], рис. 1.



Рисунок 1 – Образцы подготовленных труб с гидравлическими заглушками.

Образцы труб подвергались воздействию гидравлического давления при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ в среде «вода в воде». Равномерно подавали испытательное давление. Уровень давления фиксировался каждые 5 секунд.

⁺ – Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: kovriga@polyplastic.ru

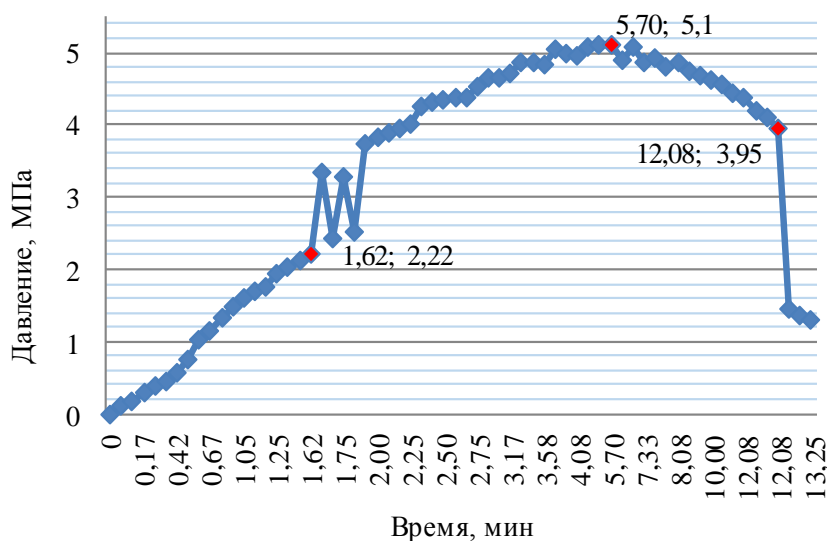


Рисунок 2 – Характер изменения давления во времени

Испытательное оборудование соответствует ГОСТ ISO 1167-1-2013.

В ходе гидравлических испытаний характер изменения давления проходит следующие стадии:

1. Набор давления.
2. Достижение давления, позволяющего вызвать возникновение зоны пластического разрушения.
3. Формирование зоны пластического разрушения.
4. Разрушение образца, сопровождающееся резким спадом давления.

График изменения давления во времени представлен на рис. 2.

Кривая изменения давления после начала возникновения зоны пластического разрушения вследствие резкого увеличения объёма показывает его падение, а после формирования зоны – повышение. Кривая изменения давления в процессе пластического разрушения может быть полностью аналогична кривой растяжения [6].

После воздействия гидростатического давления согласно [7] определяли следующие параметры зоны пластического разрушения:

На образце трубы, оставшемся после удаления зоны пластического деформирования, определяли:

- максимальную остаточную деформацию вне зоны пластической деформации по отношению $P2/P1$;
- степень кристалличности методом ДСК по изменению теплосодержания при плавлении (2);
- предел текучести;
- длину распространения шейки;
- естественную кратность вытяжки (ЕКВ)
- величину остаточной деформации.

Определение ЕКВ при одноосном растяжении проводили в условиях по ГОСТ 11262-80. При этом в шейке измеряли размеры поперечного сечения образца до распространения шейки и в шейке. Поскольку шейка (зона пластического разрушения) в трубных образцах образуется в условиях сохранения

продольного размера, то показатель ЕКВ в отличие от одноосного растяжения определяли только на основании измерения толщины стенки трубы после перехода в зону пластического разрушения.

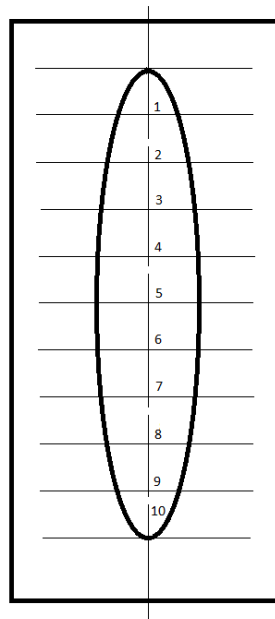


Рисунок 3 – Разметка зоны разрушения образца трубы.

На рис. 3 приведены, в качестве примера, данные по кратности вытяжки в различных частях зоны пластического разрушения газовых труб из полиэтилена 80 производства завода Ставропольполимер. Нумерация частей зоны проводилась по вертикали. Зона разбивалась на 10 частей. На рис 3 показана разметка зоны разрушения образца трубы и номера частей зоны обозначены цифрами на правом краю рис. 4. Из приведенных данных видно, что максимальная вытяжка характерна только для средних частей зоны пластического разрушения 4,5,6,7. Именно там и реализуется естественная кратность вытяжки, которая определяется как среднее

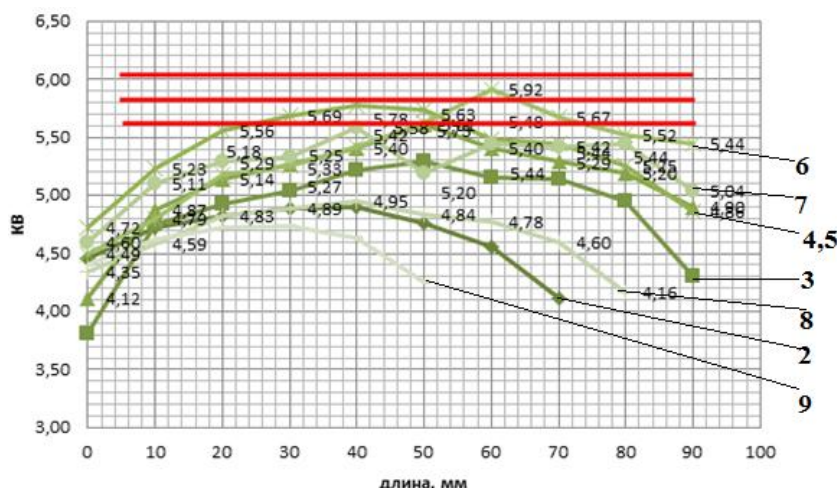


Рисунок 4 – Распределение кратности вытяжки по длине зоны пластического разрушения для ПЭ80 РЕ4РР25В, ЕКВ=5,7.

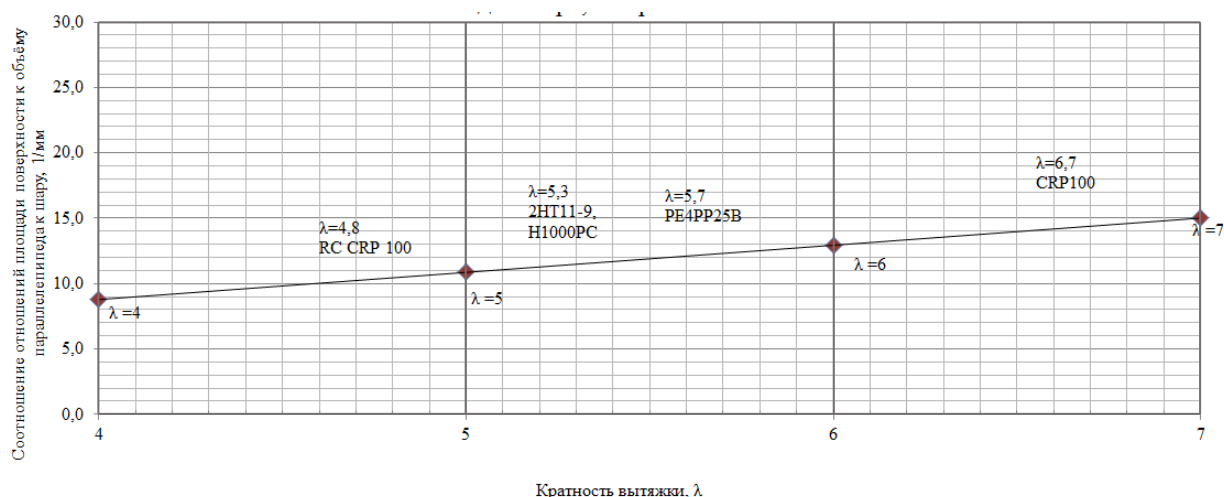


Рисунок 5 – Зависимость отношения поверхности к объёму, нормированного по минимальному значению для шара, от кратности вытяжки. Объём принимался равным 1 см³.

значение из набора максимальных значений. Видно, что вытяжка в верхних и нижних частях зоны не достигает значений естественной кратности и находится на уровне вытяжки в переходной зоне.

Прямыми линиями обозначены зоны формирования ЕКВ. Средняя линия даёт среднее значение ЕКВ. На графиках представлены значения толщины в различных участках зоны пластического разрушения. Значение ЕКВ определяется по минимальной толщине в средних зонах.

Величина КВ определена, как среднее арифметическое значение в зоне широкого максимума, справа и слева - переходные зоны.

С.Л. Баженов и А.А. Берлин отметили существование и важность переходной зоны [8]. В.Э. Геллер изучил условия её формирования [5]. В настоящей работе ситуация в переходной зоне не рассматривается.

В табл. 1 представлены значения ЕКВ, определённые в условиях одно и двухосного растяжений для четырёх марок ПЭ.

Таблица 1 – Значения ЕКВ при одноосном и двухосном растяжениях

Марка ПЭ	ЕКВ при двухосном растяжении	ЕКВ при одноосном растяжении
ПЭ100 Н1000РС	5,3	5,0
ПЭ100 2НТ11-9	5,3	5,4
ПЭ80 РЕ4РР25В	5,7	6,0
ПЭ100 CRP100	6,7	6,9

Видно, что параметры ЕКВ при одноосном и двухосном растяжениях практически одинаковы.

А.Л. Волынский и Н.Ф. Бакеев [9] отмечают, что переходы в полимерах можно характеризовать по изменению отношения поверхности к объёму. С учётом этого на рис. 5 показано изменение отношения поверхности к объёму для различных кратностей вытяжки, нормированное по минимальному отношению поверхности к объёму для шара. Видно, что различные виды сополимеров этилена имеют ЕКВ в пределах до 7λ.

Величина ЕКВ для изученных труб со сроком эксплуатации от 13 до 35 лет составляет, как правило, от 4 до 6, что совпадает со значениями, полученными на трубах, не находившихся в эксплуатации. Это показывает, что характер пластической деформации, т.е. отношение поверхности к объёму при возникновении вытяжки мало изменяется. Экспериментальные данные приведены на рис. 6.

Было замечено, чем больше срок эксплуатации, тем меньше зона пластического разрушения, характеризуемая параметром максимальной ширины зоны пластического разрушения, L_{min} (длиной пробега шейки).

При оценке напряжения в кольцевом сечении, определяемого величиной предела текучести материала трубы, наблюдается тенденция его увеличения в связи с нарастанием кристалличности. Это, с одной стороны повышает сопротивление внутреннему давлению, с другой - увеличивает риск хрупкого разрушения.

При сопоставлении данных по свойствам ПЭтруб с сильно различающимися сроками эксплуатации возникает сомнение о правомерности сопоставления материалов, произведённых с разницей в датах выпуска 25–30 лет. Поэтому была предпринята попытка сгруппировать изученные материалы по показателю ЕКВ, считая, что материалы с близкими значениям ЕКВ сопоставимы между собой незави-

симо от даты и технологии их производства. Были выделены три группы значений естественной кратности вытяжки:

- 1 группа - от 3,7 до 4,7;
- 2 группа – от 4,7 до 5,7;
- 3 группа – от 5,7 до 6,7.

Результаты представлены в табл. 2.

Обработка совокупности экспериментальных данных показала, что по показателю изменения ЕКВ формула линии тренда $y = -0,165x + 4,7235$ для 1й группы, $y = -0,0021x + 5,1662$ для 2й группы ЕКВ, $y = -0,0203x + 6,6424$ для 3й группы ЕКВ.

Как видно, повышение степени кристалличности за время эксплуатации наблюдается для материалов 2 группы, для материалов 3 группы наоборот наблюдается небольшое снижение кристалличности. Для материалов 1 группы изменений не наблюдается. По показателю степени кристалличности для 1й группы ЕКВ формула линии тренда $y = 0,0079x + 62,814$, для 2й группы ЕКВ – $y = 0,326x + 54,386$, для 3й группы ЕКВ $y = -0,1755x + 65,956$.

Значение предела текучести сохраняются практически на одном уровне для материалов 1 и 3 группы. Для материалов 2 группы в связи с большим разбросом результатов определить тенденцию не представляется возможным.

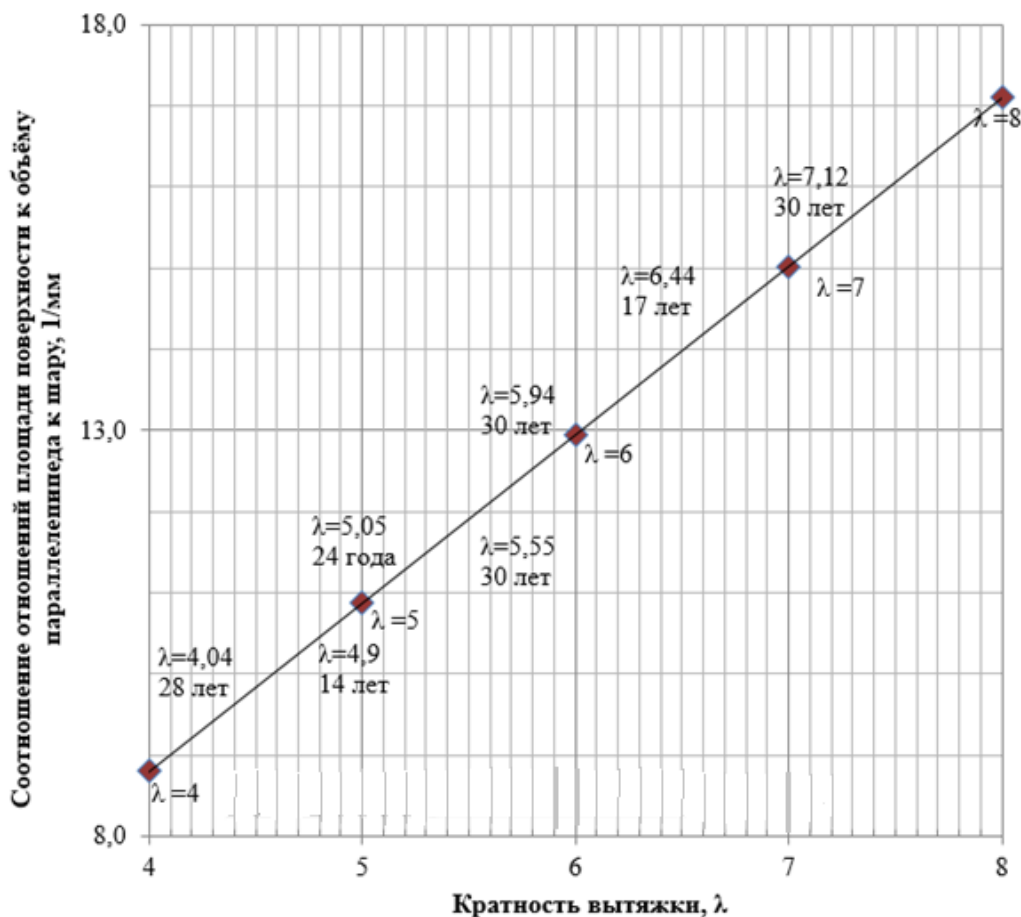


Рисунок – 6. Зависимость отношения поверхности к объёму, нормированного по минимальному значению для шара, от кратности вытяжки. (Объём принимался 1 см³.) для полиэтилена из образцов труб с длительным сроком эксплуатации.

Таблица 2 – Показатели свойств материала в зависимости от ЕКВ.

№	ЕКВ	% кр.	σ , МПа	лет	P2/P1, %	Lш max, мм
ЕКВ от 3,7 до 4,7						
36	4,42	62	29,06	13	38,8	102
3	4,62	66	21,72	17	102,7	20
50	4,31	63	21,91	21	106,5	95
56	4,21	61	27,89	26	105,1	25
29	4,69	63	20,01	26	104	8
37	3,77	59	23,4	28	110,6	55
26	4,04	59	20,83	28	126,3	63
18	4,61	71	21,75	30	110,7	23
ЕКВ от 4,7 до 5,7						
32	5,7	58	16,93	9	166,4	70
31	4,9	57	24,85	14	128,9	65
35	4,76	59	22,39	15	113	40
22	4,83	62	19,34	22	97,8	110
42	4,94	64	22,98	22	102,3	24
44	4,8	61	18,95	24	107,2	29
19	4,81	70	26,98	24	101,4	13
16	5,05	59	22,07	24	177,8	32
21	5,06	60	20,19	24	170,1	80
15	5,07	58	23,59	24	102,8	36
40	5,11	64	18,78	24	103,8	53
25	5,56	56	26,47	24	98,6	40
55	5,62	59	21,4	24	104,8	14
39	4,86	63	23,74	25	111,9	17
17	5,33	74	24,93	25	102,1	14
38	5,66	62	32,62	25	102	44
51	5,11	53	17,97	26	104,2	14
43	4,89	72	-	27	107,6	29
30	4,83	70	22,23	28	104,3	20
23	4,99	67	23,52	28	127,2	134
20	5,08	59	22,06	28	103,6	46
45	5,55	63	23,38	30	114,5	57
27	4,88	61	22,63	31	39	112
14	5,39	63	22,89	32	107,9	19
ЕКВ от 5,7 до 6,7						
9	5,86	61	23,71	16	102,5	36
53	6,44	71	22,26	17	105,8	13
28	6,63	62	23,19	17	104,5	30
33	6,17	59	24,22	27	154	38
24	5,94	62	22,57	30	106	22

Что касается величины остаточной деформации, то она растёт для материалов 3 и 1 группы и имеет тенденцию к снижению для материалов 2 группы. По показателю величины остаточной деформации

ции, формула линии тренда для 1й группы ЕКВ – $y = 3,4133x + 19,947$, для 2й группы ЕКВ – $y = -2,4397x + 171,33$, для 3й группы – $y = 1,7043x + 78,089$.

По показателю предела текучести, формула линии тренда для 1й группы ЕКВ – $y = -0,2531x + 29,3$, для 2й группы ЕКВ – $y = -0,0264x + 21,066$, для 3й группы – $y = 0,0099x + 22,977$.

Показатель длины распространения шейки, соответствующий показателю относительного удлинения при одноосном растяжении только в одном случае имеет тенденцию к уменьшению при увеличении продолжительности эксплуатации.

По показателю длины распространения шейки, формула линии тренда для 1й группы ЕКВ – $y = -2,8533x + 116,28$, для 2й группы ЕКВ – $y = -0,3176x + 53,995$, для 3й группы – $y = 0,1062x + 25,527$.

Выводы

1. Изучены особенности пластического разрушения полиэтиленовых труб газопроводов при одноосной и двухосной вытяжке. Показаны, что в обоих случаях процесс контролируется естественной кратностью вытяжки.

2. Естественная кратность вытяжки стабильна в широком диапазоне времени эксплуатации и может определять остаточный ресурс полиэтиленовых труб газопроводов.

3. Показатель естественной кратности вытяжки может быть определён и в испытаниях по одноосному растяжению, что существенно упрощает процедуру диагностики.

Литература

- ГОСТ Р 54866-2011 (ИСО 9080:2003) Трубы из термопластичных материалов. Определение длительной гидростатической прочности на образцах труб метод экстраполяции.
- Кузнецова О.В., Сергеев В.И., Калугина Е.В., Горбунова Т.Л., Сафронова И.П., Коврига В.В. Полимерные трубы №2. – 2007. – с.31–42.
- Тарасов В.В., Клименко В.А., Гельман А.В., Шпара И.А., Колбая В.Г., Метелкин В.А., Ковязин М.В., Коврига В.В. Возможность технического диагностирования полиэтиленовых газопроводов, эксплуатирующихся более 40 лет. Газ России №4, 2015. – с.50–57.
- Айзенштейн Э.М. Разработка процессов производства полиэфирных волокон, основанных на принципах физической и химической модификации полиэтилентерефталата. Диссертация на соискание учёной степени д.т.н. – Калинин, 1983. – С. 68.
- Геллер В.Э. Научные основы процесса упрочнения ПЭТФ-нитей при ориентационном вытягивании и высокоскоростном формовании. – Тверь, 2014. – С. 142.
- ГОСТ ISO 1167-1-2013 Трубы, соединительные детали и узлы соединений из термопластов для транспортирования жидких и газообразных сред. Определение стойкости к внутреннему давлению. Часть 1. Общий метод.
- Колбая В.Г., Сеньковский А.Н., Тришина Е.А., Коврига В.В. По аналогии в виде кривой нарастания давления при гидравлическом нагружении труб и кривой растяжения. Пластические массы. – № 1-2. – 2015. – С. 31–34.
- СТО 73011750-012-2014. Пластмассы. Метод определения параметров зоны пластического разрушения полимерных труб.
- Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г.. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология: Научное издание – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010 – 352 с.
- Вольнский А.Л., Бакеев Н.Ф.. Роль поверхностных явлений в структурно-механическом поведении твёрдых полимеров. – М.: Физматлит, 2014. – 356 с.

V.G. Kolbaya, V.V. Kovriga

Plastic failure in polyethylene pipes with different working life

When determining the working resource of polyethylene gas pipes used is well developed its prediction techniques [1]. However, after the pipes have worked 40 years, according to ОАО "Gazprom" standards of performance diagnostics to be carried out to determine the possibility of further operation of gas pipelines. Widely known for evaluation of diagnostic polyethylene pipes on the nature of fracture, the transition from ductile to brittle. However, determination of the nature of fracture - ductile and brittle - is based on a qualitative assessment. In this paper, we attempt to assess the use ductile option natural extension ratio (NER), widely used in studies on chemical fibers. Character NER changes studied under uniaxial and biaxial loading. It is shown that in both cases there is a similar picture of plastic failure. We estimate the value of the NER. For pipe materials shown that NER parameter changes significantly when switching from one brand to the polyethylene pipe to other.

Keywords: polyethylene pipe, plastic failure, the natural extension ratio (NER).

Поступила в редакцию 27.07.2016.

© В.Г. Колбая, В.В. Коврига, 2016