

ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА АРМИРОВАННЫХ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Бабенко Ф.И., Федоров Ю.Ю.

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия
Тел/факс: (4112) 357392 / (4112) 357333, e-mail: yuristan@yandex.ru*

В работе представлены результаты испытаний на кратковременную прочность модельных образцов, изготовленных из армированных синтетическими нитями полиэтиленовых труб (АПТ).

Выявлена определяющая роль конструктивно-технологического фактора в обеспечении применимости армированных полимерных труб для сооружения трубопроводов в условиях холодного климата. Установлено, что внутренний технологический слой, связывающий армирующие нити и обеспечивающий конструктивную связь между внешним и внутренним полимерными слоями АПТ (ЗАО «Сибгазппарат»), может являться инициатором хрупкого разрушения трубы при температурах ниже -15°C . В трубах с иным конструктивным решением (ООО «Технология композитов»), наблюдается исключительно вязкий характер разрушения во всем диапазоне климатических температур.

Ключевые слова: армированная полиэтиленовая труба, слой, хрупкое разрушение, низкие температуры, вязкое разрушение, адгезия, трещина.

В новой редакции СНиП 42-01-2002 «Газораспределительные системы» предлагается внести дополнение, допускающее использование армированных полиэтиленовых труб (АПТ) и, в частности, армированных синтетическими нитями: «... при условии подтверждения в установленном порядке их пригодности для применения в строительстве» [1].

Применение армированных труб из полимерных композиционных материалов в условиях холодного климата требует подтверждения их работоспособности с учетом воздействия факторов окружающей среды. Достоверная оценка надежной работоспособности конкретного типа неметаллических труб может быть получена только на основе комплекса расчетных и экспериментальных исследований и систематического анализа опыта их эксплуатации. В [2] была предложена декомпозиция задачи комплексной оценки несущей способности АПТ с определением трех основных подзадач, одна из которых предусматривает оценку кратковременной прочности конструктивных элементов АПТ при пиковых значениях нагрузок, т.е. при квазистатической рабочей нагрузке. В работе представлены ре-

зультаты испытаний на кратковременную прочность модельных образцов, изготовленных из армированных синтетическими нитями полиэтиленовых труб (АПТ).

АПТ состоит из трех слоев: внутреннего и внешнего из полиэтилена и промежуточного – армирующего (рис. 1). Армирование полиэтиленовых труб синтетическими нитями осуществляется либо намоткой заранее подготовленной ленты определенной ширины, состоящей из определенного числа нитей и адгезива (полиэтилен, сэвилен) (тип I), либо намоткой отдельных комплексных нитей намоточной машиной без адгезива (тип II).

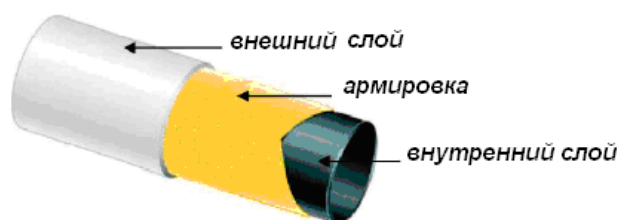


Рисунок 1. Конструктивная схема АПТ

Согласно, ISO DTS 18226 «Reinforced thermoplastic piping systems for gaseous fuels» («Техническая спецификация. Армированные трубопроводы из термопластов для горючих газов»), понятие разрушения трубы определяется как – разрушение армировки под воздействием растягивающих напряжений. При этом не допускается разрушение внутреннего и внешнего слоя и потеря герметичности трубы.

В настоящее время основными производителями АПТ в России являются ООО «Технология композитов» г. Пермь и ЗАО «Сибгазппарат» г. Тюмень. Они выпускаются с 2000 года и имеют соответствующее разрешение Ростехнадзора.

АПТ производства ЗАО «Сибгазппарат» ТУ 2248-003-35323946-2003 состоит из трех слоев: внутреннего и внешнего из полиэтилена марки ПЭ80 и промежуточного – армирующего, состоящего из двух слоев арамидных нитей, перекрестно-намотанных в направлении осей максимальных напряжений и покрытых технологическим слоем (ПЭНП, сэвилен) – тип I.

АПТ производства ООО «Технология композитов» ТУ 2248-001-55038886-01 конструктивно состоят из трех слоев: внутреннего, формируемого методом эк-

струзии из полиэтилена с MRS 8,0; силового каркаса из высокопрочных синтетических нитей, намотанных в направлении максимальных напряжений, и наружного слоя, также формируемого из полиэтилена методом экструзии – тип II.

Ниже приведены результаты оценки несущей способности АПТ в условиях холодного климата при квазистатических испытаниях на прочность при растяжении в диапазоне низких климатических температур на модельных образцах – лопатки и кольца.

Образцы изготовлены из АПТ диаметрами 140 мм (ЗАО «Сибгазппарат») и 110 мм (ООО «Технология композитов») и номинальной толщиной стенки 17,5 и 13,5 мм, соответственно. Образцы лопатки – в соответствии с ГОСТ 11262 - 80, тип 2. Продольная ось образца совпадает с осью трубы. Образцы кольца – в соответствии с ГОСТ 25.603 - 82. Испытательная машина – универсальная разрывная машина UTS-20К с температурной камерой. Температура испытаний: +20 °С, 0 °С, -5 °С, -10 °С, -15 °С, -30 °С и -60 °С, при скорости движения захватов испытательной машины 25 мм/мин (согласно требованиям ГОСТ Р 50838 - 95). Нагружение кольцевых образцов осуществлялась полудисками по ГОСТ 25.603 - 82.

*АПТ производства ЗАО «Сибгазппарат» – тип I,
модельные образцы – лопатки*

Отметим основные особенности проявления механизма разрушения образцов, пользуясь данными экспериментов: диаграммы деформирования σ – ϵ ; микрофотографии поверхностей изломов; модельные схемы и температурные зависимости $\epsilon_p(T)$ (рис. 2 - 4). Индексом ϵ_p обозначены относительные удлинения, соответствующие моменту разрушения внешнего слоя модельного образца АПТ, который четко фиксируется на диаграммах деформирования σ – ϵ характерной «ступенькой», см. рис. 2а.

При температурах испытаний $T \geq -10$ °С все образцы разрушились вязко.

При $T \leq -15$ °С наряду с вязкими, имеют место и хрупкие разрушения. Здесь и ниже термин «хрупкое разрушение образца» используется как в случае хрупкого разрыва всего образца (рис. 3а), так и в случае хрупкого разрыва только внешнего (поверхностного для трубы) слоя образца АПТ (рис. 3б). Иными слова-

ми, под «хрупким» разрушением следует понимать процесс хрупкого разрушения, как минимум, наружного слоя образца.

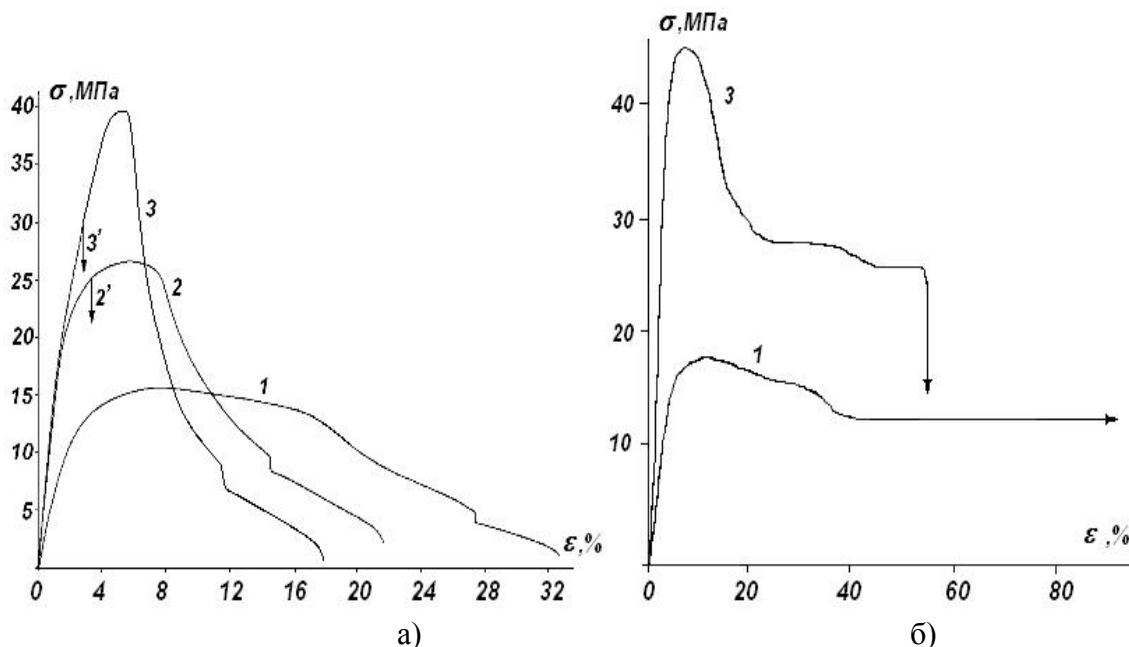


Рисунок 2. Характерные диаграммы деформирования образцов АПТ (а) и однородных образцов ПЭ80 (б) при растяжении:
1 – 20 °С; 2 и 2' – -15 °С; 3 и 3' – при температуре -60 °С

Таким образом, в квазистатических испытаниях на кратковременную прочность при растяжении модельных образцов АПТ на температурной зависимости прочности, в диапазоне температур -10 ÷ -15 °С выявлен вязко-хрупкий переход (ВХП).

При температуре испытаний $T > T(\text{ВХП})$, процессы деформирования в наружном и внутреннем слоях модельных образцов АПТ происходят «раздельно» (условно не зависимы), что выражается в не одновременном (по времени) переходе слоев в стадии потери устойчивости (шейкообразования) и разрушения. При $T \leq T(\text{ВХП})$ часть образцов разрушается хрупко, часть – вязко, успевая образовать шейку.

При $T = -60$ °С один из образцов, разрушившихся хрупко, разрушился с образованием двух коллинеарных поверхностей разлома (соответственно внешнего и внутреннего слоев модельного образца), разделенных трещиной расслоения между внутренним и технологическим (срединным) слоями, см. рис. 3в.

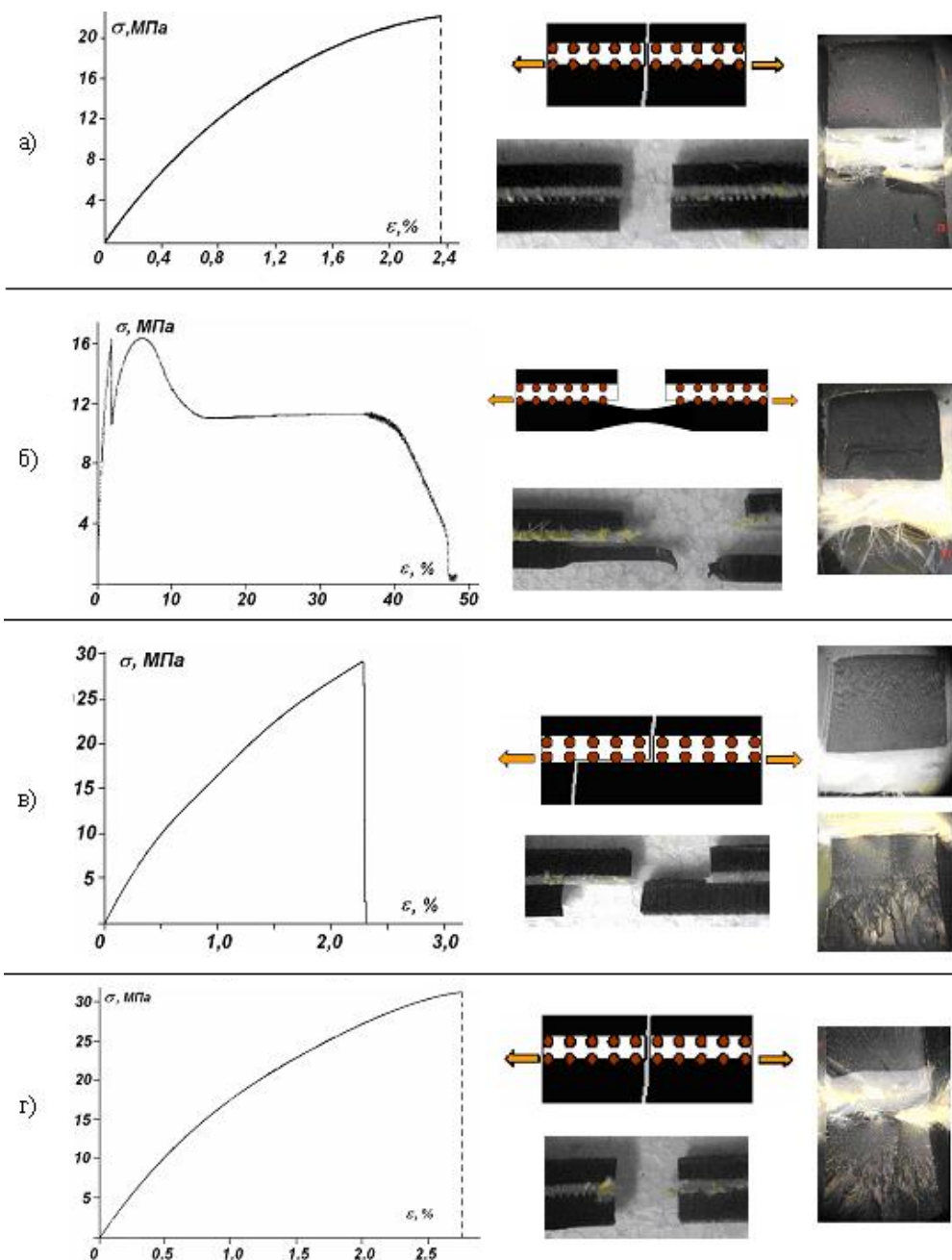


Рисунок 3. Диаграммы деформирования, модельные схемы и микрофотографии поверхностей разрушения модельных образцов АПТ, разрушившихся хрупко в испытаниях при $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а, б) и $T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в, г)

При всех температурах испытаний вязкие разрушения модельных образцов характеризуются развитием необратимой деформации (переход в шейку и дальнейшее удлинение) раздельно в двух слоях: в поверхностном и внутреннем. На диаграммах растяжения (σ - ϵ) момент разрыва первой шейки отмечается явно

выраженной «ступенькой», которая отсутствует на диаграммах растяжения гомогенных образцов, см. рис. 2.

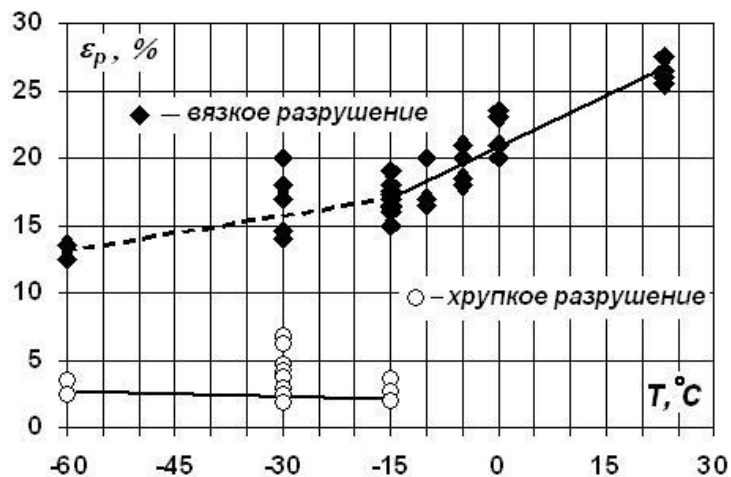


Рисунок 4. Температурная зависимость относительного удлинения при разрыве внешнего слоя модельного образца АПТ: \blacklozenge – вязкий разрыв; \circ – хрупкий разрыв.

*АПТ производства ЗАО «Сибгазппарат» – тип I,
модельные образцы – кольца*

Для проведения испытаний изготовлены специальные захваты с полудисками для растяжения кольцевых образцов. Предварительные эксперименты на кольцевых образцах внутренним диаметром $d_b = 107$ мм показали, что разрушение образцов происходит в горизонтальном сечении кольца в области зазора между полудисками. Схема нагружения, тип образца и общий вид образца в захватах испытательной машины приведены на рис. 5.

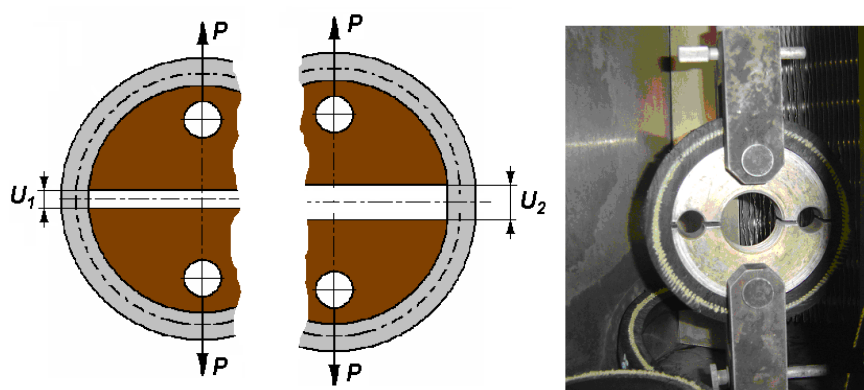


Рисунок 5. Схема и общий вид нагружения кольцевого образца.

В литературе отсутствует решение нелинейной задачи о нагружении консольного кривого бруса с граничными условиями, отвечающими особенностям описываемого эксперимента, позволяющее получить точную оценку напряженного состояния кольцевого образца. Учитывая трудности, связанные с получением точного решения, представляется целесообразным применить для расчета предельных напряжения σ и деформации ε_{max} кольцевых образцов из АПТ формулы, приведенные в [3] для определения соответствующих характеристик композитных материалов в условиях аналогичного нагружения. При этом в случае расчета σ можно ввести поправку, учитывающую влияние относительной толщины кольца c на неоднородность окружных напряжений при действии внутреннего давления [3]. Материал кольца считается изотропным. Таким образом, формулы для расчета будут иметь вид:

$$\sigma = -\frac{P_{max}}{h(1-c)d_n} k; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{2u_{max}}{\pi d_s}, \quad (2)$$

где $c = d_s / d_n$; d_s, d_n – внутренний и внешний диаметры, $k = (1+c^2)/(1+c)c$.

Неучет неоднородности напряженного состояния, связанной с изгибом, не может привести к большой погрешности в оценке σ , так как нелинейное поведение материала в условиях больших деформаций выравнивает окружные напряжения по сечению образца. Предположение об однородности распределения ε по периметру образца, положенное в основу расчетной формулы для определения деформации, должно, по-видимому, выполняться на начальном участке нагружения, когда $u \ll d_s$. При больших u реальная база, к которой относится приращение длины Δu , всегда будет меньше πd_s из-за трения между поверхностями образца и полудисков. Таким образом, расчет по формулам (1) и (2) должен привести к получению нижних оценок характеристик $\sigma, \varepsilon_{max}$ испытываемых АПТ.

В табл. 1 приведены значения условных параметров σ, ε , рассчитанных по соотношениям (1) и (2) на основании экспериментальных данных, полученных в прочностных испытаниях на растяжение модельных образцов – колец АПТ при $T_{исп} = 23, -10, -15$ °С.

Таблица 1

п/н	№ образца	T, °C	*	σ , МПа	ϵ_t , %	ϵ_p , %	σ_{cp} , МПа	$\epsilon_{t\ cp}$, %	$\epsilon_{p\ cp}$, %			
1	1	+23	в	17,158	9,6	14,8	17.106	8,7	14,5			
2	2		в	17,298	7,9	15,0						
3	3		в	16,862	8,7	13,6						
4	1.1	-10	в	28,2805	6,8	8,5	27.236	6,9	8,4			
5	1.2		в	27,7695	7,1	8,8						
6	1.3		в	28,077	6,5	7,8						
7	1.4		в	26,7325	7,3	9,3						
8	1.5		в	26,595	6,5	8,1						
9	1.6		в	26,4085	7,3	8,5						
10	1.7		в	27,048	6,6	7,7						
11	1.8		в	28,216	6,9	7,8						
12	1.9		в	27,402	6,9	8,1						
13	1.10		в	26,882	7,1	9,7						
14	2.1	-15	в	28,615	7,4	9,1	28.271	7,25	9,1			
15	2.2		в	28,2835	8,2	9,9						
16	2.4		в	28,5335	7,3	9,2						
17	2.5		в	28,369	7,3	9,1						
18	3.2		в	29,214	6,6	9,2						
19	3.4		в	26,5295	7,4	8,9						
20	3.5		в	28,355	6,6	8,3						
21	3.3		х		3,7	- " -				-	-	-
			р	25,3955								
22	2.3		х		6,7	- " -				-	-	-
		р	28,0795									
23	3.1	х		4,7	- " -	-	-	-				
		р	29,462									

Использованы условные обозначения: в, хр – вязкое и хрупкое разрушение

*АПТ производства ООО «Технология композитов» – тип II,
модельные образцы – лопатки*

Результаты экспериментов - диаграммы деформирования (σ - ϵ) и температурные зависимости $\epsilon_p(T)$ приведены на рис. 6.

Приведенные данные показывают, что разрушение модельных образцов АПТ происходит вязко во всем температурном диапазоне испытаний.

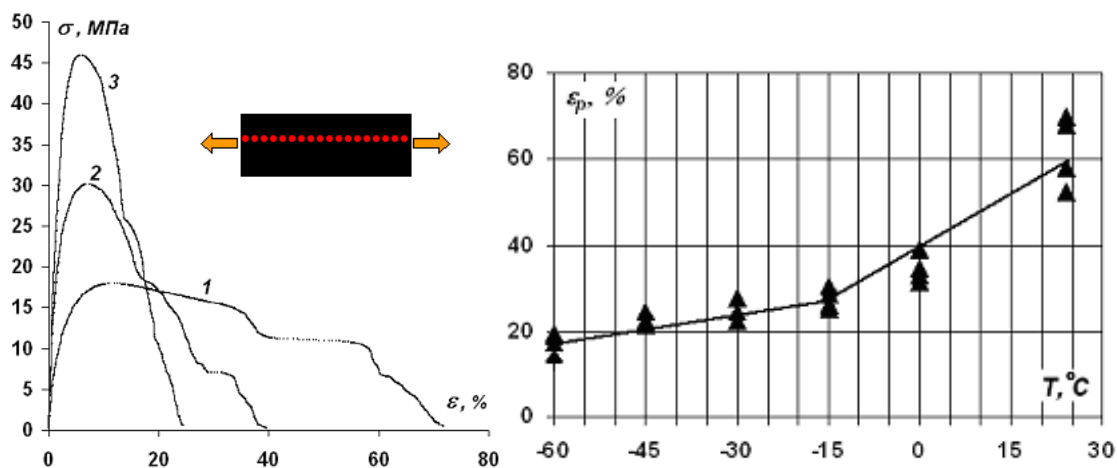


Рисунок 6. Характерные диаграммы деформирования образцов АПТ при растяжении: 1 – 20°C; 2 – -15 °С; 3 – при температуре -60 °С и температурная зависимость относительного удлинения при разрыве модельного образца АПТ

*АПТ производства ООО «Технология композитов» – тип II,
модельные образцы – кольца*

Конкретные данные не приводятся, т.к. все образцы разрушились вязко в температурном диапазоне испытаний.

На основании вышеизложенного, механизм разрушения модельного образца АПТ в испытаниях на растяжение, заключается в растрескивании технологического слоя (либо границы раздела), адгезионно связанного со слоями ПЭ80 (внутренняя и внешняя оболочки АПТ), способность которых к торможению трещины и определяет переход от вязкого разрушения к хрупкому при понижении температуры испытаний. Переход от вязкого разрушения к хрупкому определяется ВХП в механизме разрушения полимерных (ПЭ80) слоев АПТ, а именно переходом в состояние плоской деформации в вершине разрушающей трещины. Подобные эффекты для полиэтиленов наблюдались и интерпретированы нами ранее [4-5].

Природа трещинообразования, развивающегося в технологическом слое АПТ (либо на границе раздела), требует специального исследования, без которого в настоящий момент невозможно убедительно интерпретировать случайный характер проявления вязко-хрупкого перехода в механизме разрушения модельного образца АПТ. При этом отметим, что «спектр растрескивания» среднего слоя, определяющий хрупкое разрушение в температурном диапазоне испытаний, характеризуется параметрами: по $\varepsilon = 2,0 \div 6,7$ %; по $\sigma = 16,4 \div 31,7$ МПа.

Таким образом, выявлена определяющая роль конструктивно-технологического фактора в обеспечении применимости армированных полимерных труб (АПТ) для сооружения трубопроводов в условиях холодного климата. Установлено, что внутренний технологический слой, связывающий армирующие нити и обеспечивающий конструктивную связь между внешним и внутренним полимерными слоями АПТ (ЗАО «Сибгазаппарат»), может являться инициатором хрупкого разрушения трубы при температурах ниже $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. В трубах с иным конструктивным решением (прямая, без адгезива, намотка армирующих нитей, ООО «Технология композитов»), наблюдается исключительно вязкий характер разрушения во всем диапазоне климатических температур.

Литература

1. Изменение №1 СНиП 42-01-2002 «Газораспределительные системы» // Полимергаз, 2009. №4. С. 63-67, п.4.11.
2. Сальников А.Ф., Сыпачева Е.С. Оценка несущей способности полимерно-армированных труб различных типоразмеров // Вестник ИжГТУ / ИжГТУ. – Ижевск, 2003. №4. С. 20-23.
3. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – Изд. 2-е. – М.: Наука, 1975. – 264 с.
4. Бабенко Ф.И., Козырев Ю.П., Семенов В.А. «Температурные зависимости прочности неоднородно стареющих полимерных и композитных материалов» // Механика композитных материалов, 1987, №2. С. 353-355.
5. Бабенко Ф.И. Прогнозирование прочности термопластов в холодном климате с учетом старения // Материалы. Технологии. Инструменты, 2003. №3. С. 21-24.