

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ В ЖИДКИХ СРЕДАХ ВЯЗКОУПРУГИХ ТЕЛ С ТРЕЩИНАМИ

В.М. Пестриков

*Санкт-Петербургский Государственный Технологический Университет растительных полимеров.  
198092. С-Петербург, ул. Ивана Черныха 4.  
[vpest@comset.net](mailto:vpest@comset.net)*

Представлен анализ результатов экспериментов по исследованию особенностей изменения механических характеристик полимерных пленок и стеклопластиков в различного типа агрессивных средах. На основании полученных экспериментальных данных получены уравнения роста трещины в вязкоупругих материалах, находящихся в условиях воздействия жидких агрессивных сред.

### 1. Основные положения

Разрушение твердых тел с трещинами, материал которых изменяет свои свойства под влиянием различных факторов (внешних или внутренних), представляет очень сложный процесс, скорость и характер которого определяются напряженным состоянием и природой внешних воздействующих факторов [1,2]. Процесс разрушения напряженных твердых тел с трещинами под воздействием внешних факторов значительно отличается от разрушения на воздухе или в вакууме. В реальных условиях эксплуатации конструкции и их составляющие элементы редко работают в условиях близких к нормальным, когда происходит естественное изменение свойств (старение) материалов. Гораздо чаще они испытывают комплексное воздействие внешних факторов, среди которых следует отметить агрессивные среды (жидкие и газообразные), температуру окружающей среды, климатические условия и др. Действие указанных факторов в большинстве случаев негативно сказывается на долговечности материалов, что приводит в итоге их к разрушению. Кинетика разрушения в этом случае определяется процессами, связанными с изменением напряжений в зоне предразрушения и характером взаимодействия материала и среды. Процессы такого взаимодействия могут быть поверхностные, объемные, физические, химические, а также связанные с растворением и набуханием материала. Как показывают эксперименты, набухание или поверхностное растворение могут быть причиной упрочнения или повышения трещиностойкости материала. В настоящее время нет достаточно общей модели разрушения вязкоупругих тел со свойствами, изменяющимися под влиянием внешних факторов, которая была бы пригодна для практических целей. В связи с этим возникает потребность в построении модели разрушения вязкоупругих тел, которая позволила бы прогнозировать долговечность тел с трещинами с учетом воздействия внешних факторов.

### 2. Экспериментальные исследования

Выявление специфических особенностей изменения механических свойств вязкоупругих материалов, связанных с воздействием различных внешних факторов на долговечность тела под нагрузкой представляет значительный как теоретический, так и практический интерес. Сведений о воздействии внешних факторов на характеристики

деформативности и длительной трещиностойкости вязкоупругих материалов имеется недостаточно. В связи с этим были проведены экспериментальные исследования по влиянию различного типа реальных сред на деформативность и длительную трещиностойкость различных по своей природе материалов, полимеров и композитов на их основе.

**2.1. Разрушение пленочных вязкоупругих материалов под влиянием жидких сред и температуры.** Долговечность вязкоупругих материалов определяется в основном реальными условиями эксплуатации. Так, на газопроводах большого диаметра при температурах 333К...353К довольно часто защитное полимерное покрытие под действием собственного веса сползает, образуются складки и разрывы. В задаче о выборе покрытия заранее неизвестно, какое именно свойство является определяющим. Поэтому в таких задачах необходимо исследовать комплекс прочностных, деформационных и других свойств полимерных материалов. Для сокращения продолжительности испытаний следует определить характеристику наиболее чувствительную к изменению свойств [3]. Такой подход дает возможность оценить стабильность материалов в условиях воздействия внешних факторов. Применительно к пленочным вязкоупругим полимерным покрытиям, используемым для защиты трубопроводов от коррозии, чувствительными характеристиками являются:

- 1) функция ползучести (отношение плоской деформации к постоянному напряжению как функции времени);
- 2) предел прочности;
- 3) максимальное значение деформации при кратковременном растяжении.

Исследование разрушения пленок при наличии трещины (надреза) показало, что они нечувствительны к надрезам, в связи с чем основное внимание было уделено перечисленным характеристикам.

Закономерности изменения механических свойств пленочных материалов, в кислотных и щелочных растворах при нормальной и повышенной температуре, исследовались на четырех марках полимерных покрытий. Основным требованием, предъявляемым к эксплуатационным свойствам покрытий, является их стойкость к деструкции вследствие изменения механических свойств в течение срока эксплуатации (25 лет). Объектом исследования были выбраны полимерные пленки четырех типов:

1. пластикат 54-40 на основе поливинилхлорида, ТУ-6-05-1146-75, толщиной 3,5 мм;
2. двухслойная пленка на основе полиэтилена с одним адгезионным слоем, толщиной 2 мм;
3. пленка марки «ПОЛИКЕН» 980-25, толщина 2 мм;
4. пленка FG-21, толщиной 2,1 мм (производство Германии).

Ширина рабочей части образцов составляла 10 мм; длина в случае испытания на ползучесть 120 мм, а на кратковременное растяжение - 60 мм. Выбранные внешние среды моделировали составы почвенных вод в различных географических зонах. Образцы подвергались воздействию следующих внешних факторов. Воздушная среда при температуре 353К, 1% раствор каустической соды при 353К, 1% раствор каустической соды при 293К, 1% раствор  $H_2SO_4$  при 293К. Испытания на кратковременную ползучесть проводили на испытательной машине МР-0,5, цена деления силоизмерительного устройства которой 0,2 кг, точность определения нагрузки - не менее 1% от измеренной величины. Испытания на ползучесть проводились на машине ZST-3, снабженной специальной ванной и устройством для быстрого нагружения [4]. После определенного промежутка времени образцы вынимали из растворов или из термостата, вытирали, высушивали и выдерживали при 293К в течение 1-3 суток. В данном исследовании повышенная температура использовалась в качестве средства ускорения процесса изменения свойств исследуемых материалов. Каждому виду испытаний подвергали не ме-

нее 3-х образцов. В некоторых случаях образцы испытывали повторно после отдыха при температуре 333К в течение не менее 2 часов и остывания в течение 2-х – 3-х часов.

*Анализ результатов исследований и выводы.* Влияние старения на механические характеристики в соответствии с ГОСТ 9.707-81 оценивалось показателем  $\eta_{\phi}$  равным отношению значения механической характеристики материала после воздействия указанных выше факторов к ее значению в исходном состоянии. Обнаружено следующее изменение функции ползучести вследствие влияния различных факторов.

После длительного теплового старения на воздухе изменение функции ползучести составило для пластиката 54-40  $\eta_{\phi} = 1$ , для «ПОЛИКЕНА»  $\eta_{\phi} = 1,7$ , для пленки FG-21  $\eta_{\phi} = 0,6$ . 1% раствор  $H_2SO_4$  при 293К качественно на ползучесть оказывает такое же влияние, как и тепловое старение. Влияние 1% раствора каустической соды при 293К также аналогично. Несколько большее влияние раствора серной кислоты проявляется для двухслойной пленки  $\eta_{\phi} = 1,3$ , однако, учитывая высокую концентрацию раствора, этим влиянием можно пренебречь.

Проведенный эксперимент показал, что наименее подвержена изменению свойств двухслойная пленка. Воздействие активных сред и температуры зависит от характеристики ползучести, предела прочности, деформации на разрыв и марки полимерного материала. Анализ кривых ползучести показывает, что деформирование исследованных полимеров в условиях воздействия рассмотренных жидких сред и температуры может быть описано линейной теорией вязкоупругости. Ядра ползучести должны содержать реологические параметры, зависящие от ускоряющего фактора (температуры, концентрации раствора среды и т.п.), который должен быть подобран так, чтобы соблюдался принцип соответствия. При завышении значений этого фактора физический процесс изменения свойств может перейти в химическое взаимодействие среды и полимера с образованием нового типа материала. Рассмотренные среды по отношению к исследованным материалам являются инактивными, так как практически все основные механические характеристики материалов зависят от воздействия внешней среды.

**2.2. Разрушение стеклопластиков в условиях длительного воздействия повышенной температуры.** Этот тип вязкоупругих материалов все больше используют при изготовлении ответственных элементов конструкций, работающих в различных условиях эксплуатации. Особенно это характерно для авиации, где наметилась тенденция к широкому использованию стеклопластиков. Элементы конструкции самолета работают в сложных условиях при совместном воздействии нагрузок и внешних факторов. С целью установления закономерностей разрушения стеклопластиков, используемых в авиации, были смоделированы реальные внешние воздействия. Исследовалось влияние воды при температуре 353К в течение 1 месяца и при температуре 333К в течение 2 месяцев на механические характеристики стеклопластиков двух типов: (1) СТ-1 (стеклоткань Т-13, 5 слоев, связующее ВС0-200); (2) СТ-2 (стеклоткань Т-10-80, 2 слоя, связующее 5-211-Б). Исследовалось изменение характеристик прочности, деформативности и трещиностойкости. Для исследования изменения предела прочности  $\sigma_b$  и принудительной деформации при растяжении  $\varepsilon_p$  испытывались образцы размером 194x23x1,45 мм, изготовленные из материала СТ-1. Испытания образцов проводились в исходном состоянии и в условиях искусственного старения. Для каждого вида испытаний бралась партия образцов из 3 штук. Испытания проводились на разрывной машине при скорости движения захватов 22мм/мин.

Уменьшение  $\bar{\sigma}_b$  по основе в течение одного месяца при  $T = 353K$  составило 31%, аналогичный эффект наблюдается при уменьшении температуры до 333К и 313К и увеличении длительности воздействия до двух месяцев соответственно на 49,6% и

55,9%. При этом по утку  $\bar{\sigma}_b$  уменьшилось на 28%. Значения предельных деформаций  $\bar{\epsilon}_b$  в течение одного месяца при  $T = 353\text{K}$  уменьшились как по основе так и по утку на 57% и 10% соответственно. Модуль Юнга  $\bar{E}$  для стеклопластика СТ-1 за 1 месяц при  $T=353\text{K}$  уменьшился по основе на 21,2%, а по утку – на 46%. Относительный сдвиг  $\bar{\gamma}$  материалов возрос для СТ-1 в 3 раза, а для СТ-2 в 1,3 раза. Модуль сдвига  $\bar{G}$  у стеклопластика СТ-1 уменьшился в 3,5 раза, а у СТ-2 на 27%.

Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  определялось на образцах с центральной трещиной. Образцы из стеклопластика СТ-1 имели размер  $245 \times 60 \times 1,45$  мм и трещину длиной 19 мм, а из СТ-2 –  $175 \times 35 \times 0,51$  мм с длиной трещины 10 мм. Экспериментальные данные показывают, что критическое значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  после теплового воздействия в течение одного месяца уменьшилось у СТ-1 на 30%, а у СТ-2 на 11%.

Анализ изменения значений рассмотренных механических характеристик стеклопластиков двух типов показывает, что при определенных условиях, в результате воздействия температуры определенного уровня на временной базе, значительно меньшей долговременного срока эксплуатации материала, следует учитывать влияние на них интенсивности воздействия внешних факторов. В результате такого воздействия материал будет обладать такими механическими параметрами, какие бы он имел при нормальных условиях, в результате длительного естественного старения. Уменьшение трещиностойкости и других механических характеристик стеклопластика в первую очередь можно объяснить проникновением в стеклонепонитель материала, родственной по физической природе жидкости, что приводит к уменьшению удельной поверхностной энергии материала. Рассмотренная среда по отношению к данному типу стеклопластиков может быть классифицирована как активная. Ее воздействие во времени изменяет основные механические характеристики материала, что должно быть учтено при определении долговечности элементов конструкций из стеклопластиков.

### 3. Уравнения роста трещин в вязкоупругих телах в условиях жидких сред.

Уравнение роста трещины в вязкоупругих материалах с изменяющимися свойствами под влиянием внешних факторов, полученное на основе энергетического критерия, представляет интегро-дифференциальное уравнение достаточно сложной структуры, и его решение представляет большие математические трудности [5-7]. Для преодоления этих трудностей без существенной потери общности решения можно все среды по отношению к вязкоупругому материалу разбить условно на три основные группы: инактивные, активные и поверхностноактивные.

**3.1. Разрушение вязкоупругих тел в инактивной среде.** Влияние инактивной среды в основном отражается на механизме разрушения в зоне предразрушения, которое происходит вследствие изменения свойств самого материала. Для таких сред соответствующие константы в уравнении роста трещины должны зависеть от некоторого параметра, отражающего свойства внешней среды. Энергетический критерий в вариационной форме разрушения вязкоупругого тела в инактивной среде, полученный с использованием модели трещины с тонкой структурой концевой зоны при ее докритическом развитии, имеет вид [8]

$$\delta \left\{ 2\gamma(\Psi) \cdot l(t) + \int_{l(t)}^{L(t)} \sigma_0(\Psi) u_2(x_1, 0, \Psi) dx_1 \right\} = 0, \quad (1)$$

где  $\delta$  – оператор варьирования,  $\gamma$  – удельная поверхностная энергия разрушения, зависящая от внешнего фактора  $\Psi$ ;  $\sigma_0$  – нормальные напряжения в вершине трещины, согласно принятой модели трещины;  $l(t)$  – текущая длина трещины,  $L(t) = l(t) + d(t)$ ;  $d(t)$  – величина зоны предразрушения.

Исходя из (1), после преобразований получим уравнение докритического роста трещины при действии постоянной нагрузки в виде:

$$\left( \frac{K_I^*(\Psi)}{K_I} \right)^2 = 1 + \frac{d(\Psi, t)}{l(t)} \int_0^1 R \left( \frac{d(\Psi, t)}{l(t)} \cdot s \right) F(s) ds \quad (2)$$

где  $K_I$  и  $K_I^*$  соответственно – текущее и критическое значение коэффициента интенсивности напряжений;  $\dot{l}(t)$  – скорость роста трещины;  $d(\Psi, t)$  – длина зоны предразрушения как функция фактора влияния  $\Psi$ ;  $R$  – ядро ползучести вязкоупругого материала;  $\Psi = \Psi(C, D, T, f)$  – фактор влияния;  $C$  – коэффициент концентрации инактивной среды в единице объема образца;  $D$  – коэффициент диффузии;  $T$  – температура среды;  $f$  – коэффициент учитывающий другие характерные особенности системы среда – материал.

**3.2. Разрушение вязкоупругих тел в поверхностноактивной среде.** Анализ проведенных экспериментальных исследований показывает, что поверхностно-активные среды влияют в основном на разрушающую нагрузку. При этом воздействие среды проявляется в поверхностном взаимодействии с материалом, когда успевает произойти лишь хемосорбция, а иногда даже только обратимая физическая адсорбция. Эти среды в первую очередь влияют на характер разрушения через дефекты структуры, главным образом вследствие изменения свойств материала в окрестности остроконечных пустот (трещин) в деформированном материале. Именно в окрестности вершин дефектов типа трещин воздействие среды приводит к изменению сопротивления материалов распространению в нем трещины – то есть происходит изменение его трещиностойкости, а, значит, и его характеристик статической и усталостной прочности. При этом происходит снижение величины удельной поверхностной энергии, идущей на образование новых поверхностей. Условие (1) в этом случае имеет вид

$$\delta \left\{ 2\gamma \cdot l(t) + \int_{l(t)}^{L(t)} \sigma_0(\Psi) u_2(x_1, 0, t) dx_1 \right\} = 0 \quad (3)$$

Из (3) после преобразований получим уравнение роста трещины в вязкоупругом материале при воздействии поверхностно-активной среды в виде:

$$\left( \frac{K_I^*}{K_I} \right)^2 = 1 + \frac{d(\Psi)}{\dot{l}(t)} \int_0^1 R \left( \frac{d(\Psi)}{\dot{l}(t)} \cdot s \right) F(s) ds \quad (4)$$

где  $K_I^*$  не зависит от влияния среды, а длина зоны предразрушения  $d = d(\Psi)$  и нормальные напряжения в ней  $\sigma_0 = \sigma_0(\Psi)$  зависят от внешнего фактора, изменяющего разрушающую нагрузку.

**3.3. Разрушение вязкоупругих тел в активной среде.** При воздействии активной среды происходит охрупчивание или упрочнение материала лишь по истечении некоторого (иногда весьма длительного) промежутка времени. Это происходит за счет локальных физико-химических процессов взаимодействия «материал-среда» в конце трещины. При этом приложенное напряжение облегчает доступ среды в вершину трещины, так как происходит ее раскрытие. Условие (1) имеет вид

$$\delta \left\{ 2\gamma(\Psi(t)) \cdot l(t) + \int_{l(t)}^{L(t)} \sigma_0(\Psi(t)) u_2(x_1, 0, \Psi(t)) dx_1 \right\} = 0. \quad (5)$$

В этом случае уравнение роста трещины в вязкоупругом материале, находящемся в активной жидкой среде, можно записать в виде

$$\left( \frac{K_I^*(\Psi(t))}{K_I} \right)^2 = 1 + \frac{d(\Psi(t))}{\dot{l}(t)} \int_0^1 R \left( t, t - \frac{d(\Psi(t))}{\dot{l}(t)} \cdot s \right) F(s) ds. \quad (6)$$

### Выводы

Полученные уравнения докритического роста трещины в вязкоупругом теле, находящемся в условиях воздействия жидких сред различного типа, позволяют оценить долговечность тела в условиях эксплуатации [8]. Входящие в эти уравнения механические характеристики, определяются из соответствующих базовых экспериментов.

### Список литературы

1. Пестриков В.М. Экспериментальное исследование прочности и трещиностойкости полимерных покрытий в условиях старения материала. Тез. докл. IV науч.-техн. конф. "Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов". – Калининград: ЦНТИ. 1986. С. 86.
2. Пестриков В.М., Урбанский С.В. Изменение характеристик прочности и трещиностойкости полистирола в условиях старения. Тез. докл. Всесоюзной науч.-техн. конф. "Совершенствование технической эксплуатации корпусов судов". – Ленинград: Судостроение. 1989. С. 157-158.
3. Пестриков В.М. Прогнозирование механических характеристик стареющих вязкоупругих материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1998. № 9. С. 56-59.
4. Пестриков В.М. Установка для определения характеристик длительной трещиностойкости материалов в жидких средах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1998. № 11. С. 62-63.
5. Пестриков В.М. О некоторых закономерностях деформирования и длительной трещиностойкости вязкоупругих материалов в условиях естественного старения // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1998. № 5. С. 137-145.
6. Пестриков В.М. О критериях разрушения вязкоупругих тел в условиях старения материала // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1999. № 3. С. 86-96.
7. Пестриков В.М. Об определяющих соотношениях стареющих материалов с учетом протекающих физико-химических процессов // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1999. № 4. С. 134-140.
8. Пестриков В.М. Оценка долговечности вязкоупругих материалов с изменяющимися свойствами методами механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. № 12. С. 34-38.