

УДК 539.389

© 1998 г. В. М. ПЕСТРИКОВ

О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ

Исследовано влияние естественного старения на характеристики прочности и длительной трещиностойкости тринадцатилетней пленки четырех возрастов (3, 8, 16 и 23 года). Исследованы изменения предела прочности, значения предельной деформации, параметров ползучести, критического значения коэффициента интенсивности напряжений, удельной поверхностной энергии разрушения, длины зоны предразрушения, раскрытия в вершине трещины и скорости роста трещины при статическом нагружении. Показано, что для описания реологических свойств стареющих полимеров и композитов на их основе может быть эффективно использована наследственная теория старения Маслова–Арутюняна. Установлено, что скорость роста трещины является наиболее чувствительной к возрасту материала характеристикой. Уменьшение скорости роста трещины связано главным образом с изменением критического значения коэффициента интенсивности напряжений и реологических свойств материала.

1. При длительной эксплуатации элементов конструкций из вязкоупругих материалов происходит изменение их прочности и трещиностойкости, что в конечном итоге оказывает влияние на их долговечность. Одним из основных факторов влияющих на долговечность вязкоупругих материалов является их старение. Процесс старения (изменения во времени физико-механических свойств) вязкоупругих материалов связан с протекающими в них физико-химическими превращениями, интенсивность которых зависит от влияния на них различного рода факторов (температурное поле, влажность, радиация и т.п.). Если старение протекает в условиях, близких к некоторым “нормальным” (комнатная температура, средняя влажность, отсутствие интенсивного облучения), то его называют естественным. В противном случае его называют искусственным. Примерами естественно стареющих материалов являются, бетон, в котором происходящие химические реакции приводят к постоянному упрочнению материала, различного рода полимеры и композиты на их основе, древесина, лед, мерзлые грунты и т.д. Искусственное старение в зависимости от действия конкретных сред называется температурным, влажностным и т.д.

Скорость процесса старения вязкоупругого материала зависит от его чувствительности к воздействию выше перечисленных факторов и их интенсивности; а также от состава материала. Следствия старения – ухудшение механических характеристик материала, проявление трещин на поверхности, их разрастание, изменение окраски и другое. Для вязкоупругих материалов характерно необратимость эффектов повреждения. Стойкость полимеров к старению во многих случаях определяет сроки их хранения, а иногда долговечность изделия.

В [1–4] для описания напряженно деформированного состояния вязкоупругих материалов использована наследственная теория старения, в которой связь между на-

пряжениями и деформациями осуществляется с помощью операторов Вольтерра второго рода с неразностными ядрами.

Теоретические исследования по длительному разрушению стареющих вязкоупругих тел с трещинами рассмотрены в [5–8]. Исходя из δ_c -модели и теории ползучести стареющих материалов [1, 2], получены определяющие уравнения кинетики трещин в предположении, что старение оказывает существенное влияние на реологические параметры материала, в то время как характеристики трещиностойкости изменяются незначительно и их можно принять постоянными. Однако, более общие подходы по исследованию разрушения вязкоупругих тел с трещинами должны учитывать влияние старения на изменение критического значения коэффициента интенсивности напряжений K_c^* , предел хрупкой прочности σ_0 и длину зоны предразрушения d .

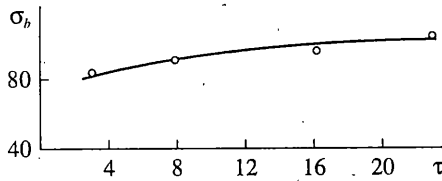
Вопросы экспериментального исследования влияния естественного старения на характеристики прочности и длительной трещиностойкости полимеров и композитов на их основе до настоящего времени изучены недостаточно. Так, в [9–14] исследовано влияние естественного старения на некоторые механические свойства полиэтилена 11502-70 и 16802-70, винилпласта, композитов К-211-2, К-18-36, стеклопластика и бетона. Определены значения предела прочности σ_b , модуля Юнга E и предельной деформации ϵ_p в зависимости от возраста.

Целью данной работы явилось экспериментально-теоретическое исследование влияния естественного старения полимерного материала на характеристики прочности и длительной трещиностойкости. Для испытаний была использована триацитатная пленка, которая применяется для рентгенографических работ производства Шосткинского ПО "Свема". Пленка хранилась на складе в естественных условиях при комнатной температуре. Исследования проводились на пленке 4-х возрастов, 3 года, 8 лет, 16 лет и 23 года.

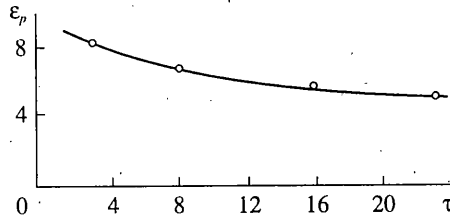
2. Для исследования закономерностей изменения предела прочности σ_b и предельной деформации ϵ_p было изготовлено несколько партий лопаточных образцов, по 6 образцов в каждой партии, различного возраста. Образцы имели размер $250 \times 15 \times 0.18$ мм с длиной рабочей части 170 мм. Испытания проводились на разрывной машине при скорости движения захватов 22 мм/мин. На фиг. 1 приведена зависимость σ_b (МПа) от возраста материала τ (годы) полученная из эксперимента. Выявление существенности влияния старения материала на предел прочности σ_b было проведено с помощью критерия Стьюдента [15]: $|t| = |\bar{x} - \bar{y}| / s$, где \bar{x} , \bar{y} – выборочные средние, s – эмпирическая дисперсия. В результате обработки полученных экспериментальных данных получено $t = 73.182$, что больше табличного значения $t_{\text{табл.}} = 0.7$ и дает основание считать, что расхождение между средними значениями обусловлено влиянием процесса старения материала. Анализ полученных данных показал, что предел прочности монотонно увеличивается с возрастом материала и за 20 лет это увеличение составило примерно 20%. Полученный результат согласуется с имеющимися данными зависимости предела прочности σ_b от возраста τ для стеклопластиков, композитов, в частности, К-211-2 и К-18-36, бетона и др. [1, 6, 10, 12–14].

Предельные деформации при растяжении ϵ_p определялись в том же эксперименте, что и σ_b . График изменения ϵ_p от возраста материала τ приведен на фиг. 2. Как видно из полученных результатов, предельная деформация с возрастом уменьшается и за 20 лет это уменьшение составило 60.3%. Уменьшение ϵ_p в условиях естественного старения полимеров и композитов на их основе отмечается большинством проведенных исследований [9, 10].

Модуль Юнга E определялся согласно ГОСТ 9550-81. Для проведения испытаний были изготовлены плоские образцы $298 \times 25 \times 0.18$ мм, по 6 образцов каждого возраста. Значения E для каждого возраста материала получены следующие: $\tau_1 = 3$ года, $E = 4470$ МПа; $\tau_2 = 8$ лет, $E = 4640$ МПа; $\tau_3 = 16$ лет, $E = 4996$ МПа; $\tau_4 = 23$ года, $E_\infty = 5456$ МПа. Модуль Юнга E за 20 лет хранения возрос на 22% и как показывают при-



Фиг. 1



Фиг. 2

веденные данные увеличение является монотонным и приближается к предельному своему значению E_{∞} в старом возрасте. Для аналитического описания модуля Юнга E исследуемого полимерного материала во времени можно воспользоваться известной зависимостью предложенной в [1] для такого распространенного стареющего материала как бетон

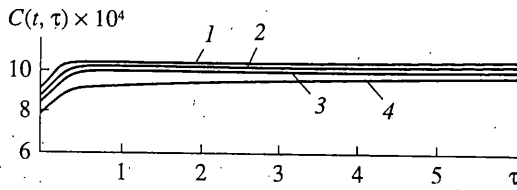
$$E(\tau) = E_{\infty}1 - \beta \exp(-\alpha\tau) \quad (2.1)$$

где E_{∞} , β и α – некоторые константы.

Для исследуемой триацетатной пленки значения констант в формуле (2.1) следующие $\beta = 0.16$, $\alpha = 0.03$, а E_{∞} принято равным модулю Юнга в возрасте $\tau = 23$ года. Максимальное отклонение опытных данных от значений определенных по формуле (2.1) не превышает 3%. Полученные результаты для модуля Юнга E качественно согласуются с данными имеющимися в литературе для полимеров и композитов на их основе [10, 11].

3. Ползучесть триацетатной пленки исследовалась на плоских образцах размером $298 \times 25 \times 0.18$ мм. Деформацию ползучести измеряли механическим тензомером МК-3 с ценой деления 0.01 мм. Нагрузка была подобрана таким образом, чтобы прирост деформации ползучести происходил в течении дня и выполнялась линейная упругонаследственная зависимость между напряжениями и деформациями. Испытания проводились на машине ZST-3, снабженной специальными приспособлениями, обеспечивающими стабилизацию значения нагрузки в течении 1 с. Первый отсчет деформации ползучести осуществлялся через 3 с после момента включения нагрузочного устройства. Время измерялось секундомером с ценой деления 0.1 с. Используемая методика позволила достаточно точно определить начальный участок кривой ползучести [16]. кривая ползучести строилась для каждого возраста материала на основании усреднения результатов на ползучесть шести образцов. Кривые ползучести для 4-х возрастов показаны на фиг. 3 (нагрузка $\sigma = 44,4$ МПа, кривая 1 соответствует 3 годам, 2 – 8 годам, 3 – 16 годам, 4 – 23 годам). Из анализа кривых ползучести следует, что материал в молодом возрасте имеет большие деформации, чем в старом. Качественное изменение деформаций ползучести согласуется с результатами испытаний на ползучесть бетона [1, 13, 14]. Для описания деформирования стареющих вязкоупругих материалов используют неразностные ядра, обычно в виде [1, 2]:

$$K(t, \tau) = -\partial/\partial\tau[1/E(\tau) + C(t, \tau)] \quad (3.1)$$



Фиг. 3

где $E(\tau)$ – модуль упругомгновенной деформации, а $C(t, \tau)$ – мера ползучести стареющего материала. Мера ползучести $C(t, \tau)$ представляется как произведение двух функций

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau)f(t - \tau) \quad (3.2)$$

где $f(t - \tau)$ – функция, учитывающая наследственность материала, а $\varphi(\tau)$ учитывает его старение.

В настоящее время наиболее распространенный вид функций $f(t - \tau) = 1 - \exp(-\gamma(t - \tau))$, а $\varphi(\tau) = C + A \exp(-\mu\tau)$. Ядро ползучести построенное на основе таких функций достаточно хорошо описывает кривые ползучести на большой временной базе (сутки). В данном исследовании эксперимент на ползучесть был проведен на временной базе несколько часов и мера ползучести строилась с использованием слабосингулярной функции [2, 17]:

$$C(t, \tau) = (C + A \exp(-\mu\tau)) \int_{\tau}^t \mathcal{E}_{\alpha}(-\beta, t - u) du \quad (\beta > 0, 0 \leq \alpha \leq 0.1) \quad (3.3)$$

где \mathcal{E}_{α} – функция Ю.Н. Работнова; A, C, μ, β, α – реологические параметры материала, определенные из эксперимента. Параметры входящие в меру ползучести $C(t, \tau)$ (3.3) полученные из обработки кривых ползучести (фиг. 3) следующие: $A = 4 \times 10^{-3}$, $C = 1.5 \times 10^{-3}$, $\mu = 0.016 \times 10^{-4}$ 1/ч, $\alpha = 0.924$, $\beta = 1.34$. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от расчетных $s = 5.6 \times 10^{-7}$. Ядро ползучести в виде (3.1) позволяет описывать деформирование естественно стареющего вязкоупругого материала во время всех его возрастов. Это свойство ядра имеет большое значение, особенно при исследовании докритического роста трещины в естественно стареющих материалах на большой временной базе, когда трещина успевает пройти в материале последовательно через разные его возраста [5–8]. В том случае, когда во время роста трещины на некотором временном интервале проявление процессов старения связано с незначительными изменениями параметров материала и их можно считать постоянными для данного возраста, то тогда ядро ползучести для данного возраста можно построить, например, на базе ядра Абеля в виде [8]:

$$R(t - \tau) = \lambda_i (t - \tau)^{-\alpha_i} / \Gamma(1 - \alpha_i) \quad (0 \leq \alpha_i < 1) \quad (3.4)$$

где λ_i, α_i – реологические параметры материала, зависящие от возраста материала, индексом i обозначен возраст материала. Обработка экспериментальных данных привела к следующим зависимостям параметров ядра Абеля (3.4) от возраста: $\lambda_3 = 0.271 c^{-0.065}$, $\lambda_8 = 0.245 c^{-0.073}$, $\lambda_{16} = 0.225 c^{-0.081}$, $\lambda_{23} = 0.205 c^{-0.088}$, $\alpha_3 = 0.935$, $\alpha_8 = 0.928$, $\alpha_{16} = 0.919$, $\alpha_{23} = 0.912$.

Более удобно для сравнения характеристик реологических свойств материала воспользоваться аналогом времени релаксации $\text{Int}_r = -(1/1 - \alpha) \ln \lambda$, имеющим размерность секунда. Было получено: $t_{r3} = 5.29 \times 10^8$ с, $t_{r8} = 3.05 \times 10^8$ с, $t_{r16} = 0.995 \times 10^8$ с, $t_{r23} = 0.662 \times 10^8$ с. Значение модуля мгновенной упругости при этом следующие: $E_{03} =$

l , мм	τ , годы	\bar{K}_c^* , МПа м ^{1/2}	$\bar{K}_c^* \pm a$, МПа м ^{1/2}	s^2 , МПа ² м
5	3	4.04	± 0.026	0.00059
	8	4.33	± 0.016	0.00023
	16	4.67	± 0.024	0.00054
	23	4.98	± 0.014	0.00017
10	3	3.88	± 0.180	0.02936
	8	4.28	± 0.033	0.00098
	16	4.54	± 0.021	0.00038
	23	4.83	± 0.001	0.00064
15	3	3.89	± 0.028	0.00072
	8	4.29	± 0.055	0.00275
	16	4.48	± 0.022	0.00044
	23	4.75	± 0.083	0.00614

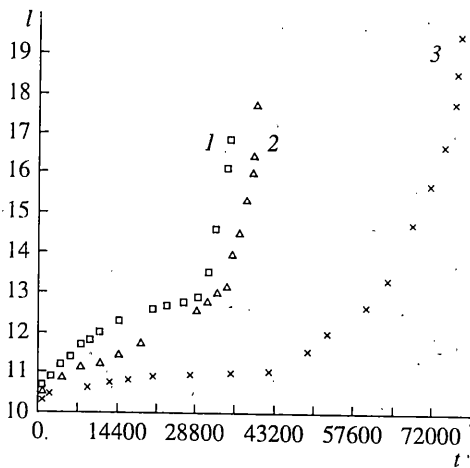
$= 6143$ МПа, $E_{08} = 6310$ МПа, $E_{016} = 6600$ МПа, $E_{023} = 6878$ МПа. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от расчетных $\bar{s} = 7 \times 10^{-13}$.

4. Критическое значение коэффициента интенсивности напряжения K_c^* для исследуемого материала определялось на образцах размером $298 \times 40 \times 0.18$ мм с центральной трещиной. Испытывались три группы образцов, с трещинами длиной 5 мм, 10 мм и 15 мм. Для каждого возраста материала бралось 6 образцов. Скорость перемещения захватов испытательной машины составляла 22 мм/мин, что было достаточно для корректного определения K_c^* . На основании экспериментальных данных определяли критическое значение коэффициента интенсивности напряжений по формуле [19]:

$$K_c^* = \sigma[\pi l \sec(\pi l / 2b)]^{1/2} \quad (4.1)$$

где σ — разрушающее напряжение, l — полудлина трещины, $2b$ — ширина образца. Результаты эксперимента с указанием длины трещины, возраста материала, среднего значения \bar{K}_c^* , доверительного интервала для \bar{K}_c^* и дисперсии \bar{K}_c^* приведены в таблице. Некоторое различие в значениях K_c^* для длин трещин $2l = 5$ мм по сравнению с трещинами большей длины обусловлено влиянием зоны предразрушения, длина которой как показано ниже имеет порядок 0.7–0.9 мм. На основании анализа приведенных данных следует, что критическое значение коэффициента интенсивности напряжений увеличивается с возрастом материала, так за 20 лет оно составило, примерно 25%. Такое увеличение, как будет показано ниже приводит к существенному снижению скорости роста трещины (фиг. 4). Увеличение критического значения коэффициента интенсивности напряжений с возрастом отмечено и для естественно стареющего вязкоупругого материала, бетона [14]. В работе отмечается сильная линейная корреляционная связь между критическим значением коэффициента интенсивности напряжений и прочностью при растяжении.

Удельная поверхностная энергия разрушения γ в некоторых работах [20, 21] используется для описания закономерностей длительного разрушения. Определение величины γ для исследуемого материала с учетом его старения дает возможность получить количественные оценки влияния изменения свойств материала на процесс разрушения твердых тел. Для определения удельной поверхностной энергии разрушения γ можно использовать некоторые соотношения из теории механики разруше-



Фиг. 4

ния. По выше определенным значениям K_c^* и E найдем γ из соотношения для плоского напряженного состояния:

$$\gamma = (K_c^*)^2 / 2E \quad (4.2)$$

Значения γ для четырех возрастов триацетатной пленки составили: $\tau_1 = 3$ года, $\gamma = 1730$ дж/м м; $\tau_2 = 8$ лет, $\gamma = 1990$ дж/м м; $\tau_3 = 16$ лет, $\gamma = 2080$ дж/м м; $\tau_4 = 23$ года, $\gamma = 2160$ дж/м м. Из полученных результатов видно, что с увеличением возраста исследуемого материала величина поверхностной энергии γ возрастает, и за 20 лет это увеличение составило примерно 25%.

Найденные значения K_c^* , σ_b и E позволяют оценить влияние старения материала на величину зоны предразрушения в вершине трещины. Для модели трещины Леонова-Панасюка-Дагдейла длина зоны предразрушения равна

$$d = \pi(K_c^*)^2 / 8\sigma_0^2 \quad (4.3)$$

где σ_0 – предел хрупкой прочности.

В соответствии с [19] принимаем σ_0 равным пределу прочности σ_b . В этом случае величина зоны предразрушения для возраста $\tau_1 = 3$ года составляет $d = 0.92$ мм; $\tau_2 = 8$ лет – $d = 0.89$ мм, $\tau_3 = 16$ лет – $d = 0.88$ мм, $\tau_4 = 23$ года – $d = 0.86$ мм. Анализ полученного результата показывает, что величина зоны предразрушения с возрастом уменьшается, так за 20 лет она уменьшилась на 6.5%.

В качестве оценочной характеристики при сопоставлении материалов часто используют критическое раскрытие трещин δ_c . Учитывая трудности, обусловленные сложностью непосредственного экспериментального определения характеристики трещиностойкости δ_c , произведем оценку этой характеристики для плоского напряженного состояния исходя из соотношения

$$\delta_c = (K_c^*)^2 / E\sigma_b \quad (4.4)$$

Значения δ_c в зависимости от возраста τ материала, полученные из формулы (4.4) следующие: $\tau_1 = 3$ года, $\delta_c = 0.042$ мм; $\tau_2 = 8$ лет, $\delta_c = 0.044$ мм; $\tau_3 = 16$ лет, $\delta_c = 0.045$ мм; $\tau_4 = 23$ года, $\delta_c = 0.042$ мм. Изменение δ_c с возрастом незначительно и имеет случай-

ный характер, поскольку δ_c определено из косвенных испытаний по значениям трех характеристик (K_c^* , σ_b , E). Поэтому можно считать, что для данного материала δ_c с возрастом практически не изменяется.

5. В работах [5–8] проведены теоретические исследования закономерностей докритического развития трещин в вязкоупругих телах, материал которых подвержен естественному старению. Построены кинетические кривые трещин в вязкоупругих телах, старение которых в основном связано с изменением реологических параметров материала, а характеристики K_c^* , σ_b , E , d , δ_c изменяются с возрастом материала незначительно и их значения близки к постоянным.

В данном исследовании построение докритических кинетических диаграмм разрушения проводилось на основании эксперимента по развитию центральных трещин длиной 10 мм в образцах с размерами 298 × 40 × 0.18 мм. На фиг. 4 показаны докритические кинетические диаграммы трещин в материале разного возраста (значения 1–3 года, 2–8 лет, 3–23 года), когда приложена внешняя нагрузка $p = 23.61$ МПа и начальное значение коэффициента интенсивности напряжения равно $K_{I0} = 3.2$ МПа м^{1/2}.

Из кинетических диаграмм видно, что инкубационный и переходной периоды занимают на них значительно меньший интервал времени (порядка 1 с), чем основной период. Скорость трещины с возрастом материала уменьшается, так средняя скорость роста трещины за 20 лет старения уменьшилась в 10⁵–10⁸ раз. Уменьшение скорости трещины можно объяснить протекающими в материале процессами старения, которые приводят к повышению σ_b и K_c^* .

Произведем анализ полученного результата на основании уравнений кинетики трещин в вязкоупругом материале полученных в работах [5–8, 19–23]. Запишем уравнение кинетики для трещины растущей в вязкоупругом стареющем материале одного возраста

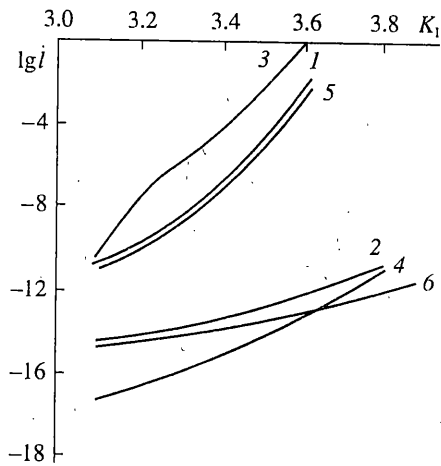
$$(K_{ci}^*/K_I)^2 = 1 + (d(t)/\dot{l}(t)) \int_0^1 R(d(t)s/\dot{l}(t)) F(s) ds \quad (5.1)$$

где $R(d(t)s/\dot{l}(t))$ – ядро ползучести, K_{ci}^* – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений для данного возраста материала при $\dot{l}(t) \rightarrow \infty$, d – размер зоны предразрушения, $\dot{l}(t)$ – скорость движения конца трещины, а индекс i обозначает значение указанной величины в заданном возрасте; $F(s) = (1-s)^{1/2} + (s/2) \ln(((1 - (1 - s)^{1/2}) / (1 + (1 - s)^{1/2})))$. Подставив ядро ползучести (3.4) в уравнение (5.1) и произведя преобразования, запишем уравнение скорости роста трещины в виде

$$\dot{l}(t) = d_i \left[\frac{\lambda_i \sqrt{\pi}}{2(2 - \alpha_i) \Gamma(2.5 - \alpha_i) ((K_{ci}^*/K_I)^2 - 1)} \right]^{1/(1 - \alpha_i)} \quad (5.2)$$

где d_i , λ_i , α_i , K_{ci}^* – параметры соответствующие данному возрасту материала.

Взяв из выше приведенных данных значения параметров для триацетатной пленки в возрасте $\tau_1 = 3$ года и $\tau_2 = 23$ года и подставив их в (5.2) построим зависимости $\dot{l}(t) = f(K_I)$ (фиг. 5), где кривая 1 соответствует $\tau_1 = 3$ года, а кривая 2 – $\tau_2 = 23$ года. Для определения параметров, оказывающих наибольшее влияние на скорость роста трещины в процессе старения зафиксируем в уравнении параметры, зависящие от возраста материала и построим зависимости $\dot{l}(t) = f(K_I)$. На фиг. 5 показаны: кривая 3 в случае, когда параметры d и K_c^* в процессе старения изменяются незначительно и старение оказывает основное влияние на реологические параметры материала; кри-



Фиг. 5

вая 4 – старение оказывает влияние только на K_c^* ; кривая 5 – старение оказывает влияние только на d ; кривая 6 – старение связано в основном с изменением K_c^* и реологических параметров материала, а величина зоны предразрушения d изменяется незначительно.

Полученные зависимости $\dot{l}(t) = f(K_I)$ показывают, что среди рассмотренных параметров изменяющихся в процессе старения вязкоупругого материала и оказывающих наибольшее влияние на скорость роста трещины можно выделить реологические, K_c^* , а также их совокупность. Уменьшение скорости трещины может происходить только от изменения одного K_c^* , увеличивающегося с возрастом материала. Резкое увеличение скорости трещины, а отсюда быстрое разрушение тела наблюдается при ухудшении реологических параметров материала. Уменьшение скорости роста трещины вследствие изменения всей совокупности параметров d , λ , α и K_c^* с возрастом материала, описываемое уравнениями кинетики трещин качественно согласуется с экспериментальными кинетическими диаграммами (фиг. 4).

Обобщая полученные результаты можно сделать вывод, что для описания реологических свойств естественно стареющих полимеров и композитов на их основе может быть эффективно использована теория ползучести стареющих тел, разработанная в [1]. Скорость роста трещины является наиболее чувствительной характеристикой к возрасту материала. Уменьшение скорости роста трещины связано главным образом с изменением критического значения коэффициента интенсивности напряжений и реологических свойств материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.; Л.: Гостехиздат, 1953. 324 с.
2. Арутюнян Н.Х., Колмановский В.Б. Теория ползучести неоднородных тел. М.: Наука, 1983. 336 с.
3. Арутюнян Н.Х., Манжиров А.В., Наумов В.Э. Контактные задачи механики растущих тел. М.: Наука, 1991. 176 с.
4. Sackman J.L. On the buckling of aging, linearly viscoelastic beam-columns // AIAA J. 1967. V. 5. № 9. P. 1726–1728.

5. *Пестриков В.М.* Долговечность стареющего вязкоупругого тела с трещиной, имеющей небольшую концевую зону // Прикл. механика. 1982. Т. 18. № 11. С. 92–99.
6. *Пестриков В.М.* Долговечность стареющих вязкоупругих пластин с макроскопическими трещинами // Докл. АН УССР. Сер. А. 1982. № 6. С. 51–53.
7. *Pestrikov V.M.* Crack spreading in viscoelastic bodies with account of ageing material peculiarities // Collection of Abstracts ICE-8, KIEV, 1993. Fracture Mechanics: Successes and Problems. Pt. 2. P. 397–398.
8. *Pestrikov V.M.* The prediction test for a life period of polymer pipes // Collection of Abstracts Conference "PLASTIC PIPES IX". Edinburgh, 1995. P. 6–10.
9. *Павлов Н.И.* Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. М.: Химия, 1982. 220 с.
10. *Павлов П.А., Огородов Л.И.* Длительное сопротивление полимерных и композитных материалов с учетом времени многолетнего естественного старения // Механика композит. материалов. 1991. № 4. С. 692–696.
11. *Грицак Л.Е., Ющенко Ю.Н.* Влияние естественного старения на несущую способность и характер разрушения конструкционных стеклопластиков // Механика полимеров. 1977. № 2. С. 362.
12. *Мартиросян М.М.* О длительном старении стеклопластика // Механика композит. материалов. 1985. № 1. С. 67–69.
13. *Трапезников Л.П.* Температурная трещиностойкость бетонных сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 270 с.
14. *Ламкин М.С., Пащенко В.И.* Определение критического значения коэффициента интенсивности напряжений для бетона // Изв. им. Б.Е. Веденеева ВНИИГ. 1972. Т. 99. С. 234–239.
15. *Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение // ГОСТ 9.707-81.* М.: Изд-во Стандартов, 1981. 79 с.
16. *Колтунов М.А., Майборода В.П., Зубчанинов В.Г.* Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов. М.: Машиностроение, 1983. 239 с.
17. *Зевин А.А.* Напряжения и деформации неоднородной наследственной среды // Прикл. механика. 1973. Т. 9. № 3. С. 38–42.
18. *Колтунов М.А.* ползучесть и релаксация. М.: Высш. шкл., 1976. 277 с.
19. *Партон В.З., Морозов Е.М.* Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. 502 с.
20. *Knauss W.G.* Delayed failure the Griffith problem for linearly viscoelastic materials // Intern. J. Fract. Mech. 1970. V. 6. № 1. P. 7–20.
21. *McCartney L.N.* Crack growth laws for a variety of viscoelastic solids using energy and COD fracture criteria // Intern. J. Fract. 1979. V. 15. № 1. P. 31–40.
22. *Wnuk M.P.* Effects of time and plasticity on fracture // Brit. J. Appl. Phys. Ser. 2. 1969. V. 2. № 9. P. 1245–1259.
23. *Костров Б.В., Никитин Л.В., Флитман Л.М.* Распространение трещин в упруговязких телах // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. № 7. С. 20–35.

С.-Петербург

Поступила в редакцию 18.VI.1997