УДК 678.674: 679.7.022.45

Исследование растрескивания листового поликарбоната методом воздействия на его поверхность адсорбционно-активных жидких сред

The study of cracking of sheet polycarbonate by the method of exposure to its surface of adsorption active liquid media

А.В. МАРКОВ, Д.И. ДЕРИВОЛКОВ, Д.С. ДУВАНОВ

A.V. MARKOV, D.I. DERIVOLKOV, D.S. DUVANOV

МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова)

MIREA – Russian Technological University (Institute of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov)

markovan@bk.ru

Изучено влияние состава жидкой смеси пропанола-1 с толуолом на скорость растрескивания в напряженных поликарбонатных листах. Показано, что зависимость времени растрескивания от напряжения может быть описана с использованием уравнений, в которых величины коэффициентов зависят от соотношения компонентов этой тестовой смеси. Способ смачивания поверхности листа монолитного поликарбоната тестовой адсорбционно-активной смесью (пропанол-1 с толуолом) может быть использован не только для оценки качества поликарбонатных изделий, но и для измерения остаточных напряжений в них. Сделан вывод о многофакторности влияния исследованных тестовых жидких смесей на процесс растрескивания поликарбоната.

Ключевые слова: листовой монолитный поликарбонат, остаточные напряжения, трещиностойкость, тестовая жидкость, толуол, пропанол

The effect of the composition of a liquid mixture of n-propanol with toluene on the rate of cracking in stressed polycarbonate sheets was studied. It is shown that the dependence of cracking time on stress can be described using equations in which the coefficient values depend on the ratio of the components of this test mixture. The method of wetting the surface of a sheet of monolithic polycarbonate with a test adsorption-active mixture (n-propanol with toluene) can be used not only to assess the quality of polycarbonate products, but also to measure the residual stresses in them. The conclusion is made that the infl uence of the investigated test liquid mixtures on the cracking of polycarbonate is multifactorial.

Keywords: monolithic polycarbonate sheets, stretching, residual stresses, crack resistance, thermal shrinkage, test fluid, toluene, propanol

DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-23-27

Введение

В последнее десятилетие увеличение потребления листового поликарбоната (особенно в строительстве) вызвало прирост его ежегодного производства на ~10% [1, 2]. Это обусловлено его высокими эксплуатационными характеристиками. Однако на листах монолитного поликарбоната и объемных изделий из них в процессе эксплуатации (как и у изделий из других оргстекол) могут появляться так называемые трещины серебра. Такое микрорастрескивание не только приводит к ухудшению оптических и прочностных характеристик изделий, но и к их разрушению вследствие ускоренного роста трещин [3, 4]. Ускорению растрескивания изделий из оргстекол способствуют механические напряжения и деформации, которые возникают при их неправильном монтаже и эксплуатации. Дополнительной причиной ускоренного растрескивания могут быть остаточные напряжения, возникающие в процессе формования изделий [5–8] по разнообразным причинам [9, 10].

Существуют различные методы оценки уровня остаточных напряжений в органических стеклах, в том числе неразрушающие методики. К последним могут быть отнесены оптико-поляризационные методы [9, 11–14]. Но эти методики можно считать количественными только для поликарбонатных дисков [12–14]. Существуют методики, связанные с ускорением растрескивания при повышенных температурах [15, 16], а также при контакте с тестовыми жидкостями [5, 6, 17]. Последняя методика может быть использована для количественной оценки остаточных напряжений в поликарбонатных изделиях. Явление ускоренного разрушения твердых тел, находящихся в контакте с адсорбционно-активными жидкими средами, было обнаружено советским ученым Ребиндером и

получило название «эффект Ребиндера». Контакт с адсорбционно-активными жидкими средами приводит к значительному снижению поверхностной энергии и ослаблению связей между атомами и молекулами твердого тела. Это ослабление обеспечивает ускоренный рост поверхностных микротрещин при минимальных внешних или остаточных напряжениях. Подобные методики нашли применение при исследовании как полиакрилатных оргстекол [5, 6, 18] (при этом испытании изделие помещается в тестовую жидкость [6]), так и поликарбонатных оргстекол и изделий из них [19]. Важную роль в данном методе играет правильный выбор тестовой жидкости. Так, производители поликарбонатных оргстекол предлагают использовать для этой цели смесь пропанола с 25% толуола [19]. Другие исследователи [6] рекомендуют ту же смесь с 10% толуола. Критерием качества при этом является время начала ускоренного растрескивания испытуемого образца или изделия, которое не должно превышать определенного значения, при превышении которого изделие считается непригодным к использованию. В недавних работах [20, 21] были приведены значения напряжений, при которых поликарбонатные листы и изделия из них могут эксплуатироваться без растрескивания в течение различных прогнозируемых периодов эксплуатации. Однако использование этих данных при экспресс-анализе долговечности требует установления количественной связи между реальными напряжениями и временами растрескивания поликарбонатных стекол в контакте с различными тестовыми жидкостями.

Целью данной работы является установление количественной связи между напряжениями в листовом монолитном поликарбонате и временами его растрескивания в контакте с тестовыми жидкостями на основе смесей толуола и пропанола-1 различного состава.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований являлся листовой монолитный поликарбонат (со светостабилизированным верхним слоем) Novattro производства ООО "СафПласт", Казань (ТУ 2246-03-81057157-2008). Образцы в виде пластин толщиной $3,0\pm0,1$ мм и шириной 30 ± 1 мм, вырезанные вдоль направления экструзии листа.

В качестве тестовых жидкостей использовали смеси толуола (х.ч. ТУ 2631-065-44493179-01) и пропанола-1 (х.ч. ТУ 2632-106-4449379-07). Их характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики тестовых жидкостей [22, 23].

Характеристика	толуол, хч	пропанол-1, хч
Нормативный документ	ГОСТ 5789-78	TY 2632-106- 4449317907
Молекулярная масса (M) , Γ /моль	92,1	60,1
Параметр растворимости* (δ) , $(MДж/м^3)^{1/2}$	18,2	24,3
Поверхностное натяжение** при 20° С (γ), мН/м	28,5	23,8
Плотность (ρ), кг/м ³	867	804
Давление насыщенных паров ($P_{ m H}$), кПа	3,4	2,1

^{* –} параметр растворимости поликарбоната 20,3 (кДж/м 3) $^{1/2}$,

Нагружение образцов проводили в горизонтальном положении в зажимах специальной приставки к универсальной испытательной машине AI-7000-LA5 (Instron) фирма GOTECH Testing Machines Inc., Тайвань.

С учетом величины кратности растяжения (λ), равной отношению длины рабочего участка деформированного образца (l) к его начальной длине ($l_0=100$ мм): $\lambda=l/l_0$, истинное напряжение растяжения σ рассчитывалось как:

$$\sigma = \frac{P\lambda}{S_0} \tag{1}$$

где P — усилие (H), S_0 — площадь поперечного сечения исходного образца (м 2).

Перед испытанием поверхность образцов обезжиривалась. Испытуемый образец располагался светостабилизированным слоем вверх. Капля тестовой жидкости наносилась с помощью шприца на центральную часть образца на расстоянии капли от краев образца – не менее 5 мм. При случайном попадании тестовой жидкости на край образца результаты опыта не учитывались.

Время начала растрескивания определяли, анализируя изображения, полученные цифровой фотокамерой Nikon с микрообъективом, автоматически фиксирующей изображения капли через промежутки времени от 1 с. Время начала растрескивания (τ_c) фиксировалось при появлении первой трещины.

Результаты эксперимента и их обсуждение

При отработке методики испытания листового поликарбоната нами были проведены предварительные опыты с погружением исходных образцов, вырезанных из листового поликарбоната, в толуол и пропанол, смеси которых были далее использованы в качестве компонентов тестовых жидкостей. В соответствии с ГОСТ 12020 [17], предварительно взвешенные образцы погружали в указанные жидкости (без нагружения), через заданные промежутки времени их вынимали и удаляли остатки жидкостей (промокали дважды с двух сторон фильтровальной бумагой). После этого их взвешивали повторно. Фотографии обработанных таким образом образцов представлены на рис. 1.

После погружения в толуол образцы размягчались, набухали и становились матовыми. Исследование поверхности показало, что появление матовости (побеления) образцов не связано с микрорастрескиванием. Причиной этого являлась инклюзия толуола в поликарбонат. Крупные трещины появлялись только при высыхании матовых образцов (рис. 1а). Аналогичные ПК образцы, помещенные в пропанол, сохраняли форму и прозрачность (рис. 1б). То есть толуол проявляет большую адсорбционную активность, чем пропанол. Это подтверждается данными по поглощению толуола поликарбонатными образцами, представленными на рис. 2.

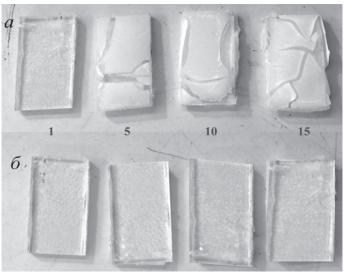


Рис. 1. Образцы листового монолитного поликарбоната, выдержанные в толуоле (а) и пропаноле (б) 1, 5, 10 и 15 мин (числа рядом с образцами).

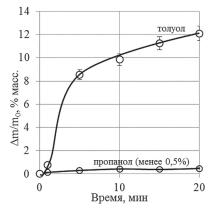


Рис. 2. Зависимость относительного увеличения массы образца от времени выдержки в компонентах тестовых жидких смесей: толуоле и пропаноле-1.

Таким образом, «активным» компонентом исследуемых тестовых смесей является толуол, имеющий более близкие к поликарбонату величины параметра растворимости и поверхностного натяжения (таблица 1). Именно он активно диффундирует в полимер, изменяя межмолекулярное взаимодействие в поликарбонате.

Методика погружения при тестировании изделия целиком в тестовую жидкость вряд ли может быть использована для испытания крупногабаритного изделия, кроме того, она может привести к его разрушению или порче. Следует также учитывать, что при вырезании из листа образца для испытания на его краях могут возникать дефекты и значительные остаточные напряжения [9], которые влияют на процесс растрескивания, ускоряя его при погружении в тестовую жидкость. Для неразрушающей экспресс-оценки напряженного состояния изделия более адекватной является методика обработки небольшой области поверхности изделия нанесением на нее прозрачной капли тестовой жидкости. Однако быстрое испарение тестовой жидкости может не позволить осуществить эксперимент до начала растрескивания. В процессе испарения с открытой поверхности капли толуол испаряется с большей, чем пропанол, скоростью. Это связано с разницей молекулярных масс и давлений насыщенных паров этих жидкостей (таблица 1). Интенсивность испарения (W) жидкости определяется, как:

$$W = \text{m/St} \tag{2}$$

где W — масса испарившейся жидкости с поверхности S за время t, в кг/(м²с)

Интенсивность испарения со свободной поверхности жидкости можно рассчитать по формуле:

$$W = D\sqrt{M}P_i \tag{3}$$

где $P_{\rm H}$ — давление насыщенных паров, M — молекулярная масса жидкости, D — коэффициент (табл. 1).

Из данных, приведенных в таблице 1, следует, что параметр $\sqrt{M}P_{_i}$ у толуола примерно в два раза больше, чем у пропанола. Поэтому и

^{** –} поверхностное натяжение поликарбоната 42,0 мН/м.

скорость испарения капли толуола оказалась больше почти вдвое. Смешение толуола с пропанолом приводит к замедлению интенсивности испарения смеси при увеличении содержания пропанола в смеси. Чем дольше не высыхает капля, тем больше запас времени для исследования процесса при больших временах растрескивания. На основании данных по кинетике высыхания одной из тестовых смесей, представленных на рис. 3, можно оптимизировать размер капли, наносимой на испытуемые образцы или изделия из поликарбоната. При объеме капли от 0,3 до 0,5 мл время высыхания оказалось достаточным для проведения данных исследований.

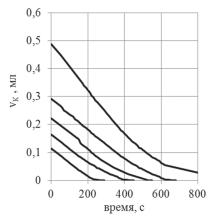


Рис. 3. Зависимость изменения объема капли смеси пропанола и 25% толуола при испарении на поверхности листа поликарбоната от времени наблюдения (начальный объем указан на шкале ординат $V_{\rm K}$ при времени 0 с).

В ходе описанных выше экспериментов было обнаружено несколько дополнительных существенных ограничений использования чистого толуола. Это быстрое помутнение капли вследствие частичного растворения полимера в тестовой жидкости и побеление центральной части обработанного толуолом участка образца (рис. 4), имеющее ту же природу, что и побеление образцов в толуоле, описанное выше (рис. 1а).

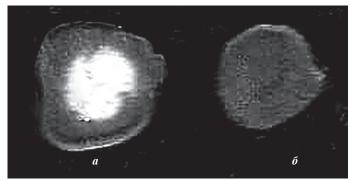


Рис. 4. Фотографии капель толуола (а) и пропанола (б), через 1 мин после их нанесения на ненагруженный образец поликарбоната.

Эти явления мешают проведению тестирования образцов на растрескивание при больших содержаниях толуола, так как они уменьшают допустимое время тестирования, маскируя появление микротрещин на образце. При использовании смесей толуола и пропанола указанные явления отмечались тем позже, чем меньше было содержание толуола в смеси. Поэтому для длительных испытаний, во избежание преждевременного помутнения капли и побеления образца, следует рекомендовать смеси с содержанием толуола 50% и менее.

Следующее важное наблюдение касается выбора размера испытуемого образца. Оказалось, что случайное попадание тестовой жидкости на край нагруженного образца вызывает быстрое преждевременное появление и разрастание трещин от края к середине образца. Такое нежелательное ускорение растрескивания (в несколько раз) связано не только с дефектностью краев образцов, но и с появлением в них дополнительных остаточных напряжений после механической обработки краев [9]. Поэтому размеры испытуемых образцов должны обеспечивать расстояние капли от краев не менее 5 мм.

На следующем этапе, прикладывая к образцам растягивающие напряжения, исследовали растрескивание нагруженных образцов.

Так как ранее [20, 21] было показано, что безопасный уровень напряжения в листовом монолитном поликарбонате (с точки зрения эксплуатации без растрескивания в течение гарантийного срока 10 лет) составляет менее 10 МПа, для исследований были выбраны напряжения в диапазоне 7-20 МПа. Через 3 минуты после нагружения на поверхность нагруженного образца наносили каплю тестовой жидкости объемом 0,5 мл. Первоначальные исследования показали, что при высоких содержаниях толуола (выше 50%) воспроизводимая фиксация малых времен начала растрескивания затруднительна. Использование смесей с меньшим содержанием толуола позволяет увеличить время растрескивания и, следовательно, увеличить точность измерения. С другой стороны, при малых содержаниях толуола в смеси (менее 10%) растрескивание не успевало произойти до полного высыхания капли. Увеличение содержания пропанола в смеси не только замедляет растрескивание, но и делает его менее интенсивным, о чем свидетельствуют фотографии на рис. 5. Это можно считать положительным фактором, так как менее интенсивное растрескивание при тестировании уровня остаточных напряжений в меньшей степени ослабит испытуемое изделие и не повлияет на его дальнейшую эксплуатацию.

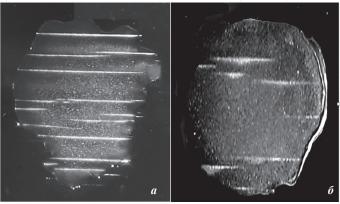


Рис. 5. Фотографии трещин «серебра» на поверхности образца поликарбоната под каплями пропанола с 50% толуола (а) и с 25% толуола (б) через 1 мин после нанесения капли при напряжении 12 МПа.

Можно предположить, что при увеличении содержания толуола тестовая смесь воздействует на меньшие дефекты в поликарбонате, которые не «активируются» при малых содержаниях толуола (на рис. 5а трещин в несколько раз больше, чем на рис. 5б).

Результаты экспериментов по растрескиванию в контакте с тестовыми жидкостями обрабатывались, как и ранее [20, 21], с использованием уравнения, аналогичного уравнению Журкова [24]:

$$\tau_{c} = \tau_{0} exp(\frac{E_{c} - \alpha \sigma}{RT})$$
 (4)

где $\tau_{\rm c}$ – время начала растрескивания поликарбоната (c); $E_{\rm c}$ – температурный коэффициент, трактуемый как энергия активации растрескивания (Дж/моль), зависящая от прочности разрушаемых химических связей полимера (при термической деструкции поликарбоната $E_{\rm TД}=150-160~\rm kДж/моль~[25,26]$); σ – приложенное напряжение в Па; T – температура испытания в градусах (293 K); $\tau_{\rm 0}$ – постоянная, связанная с частотой колебаний атомов молекул в тепловом движении, предлагаемая величина которой [24] составляет от 10^{-12} до 10^{-14} с; α – структурно-чувствительный коэффициент, трактуемый как «активационный объем» разрушения с размерностью объема в м³/моль; R – универсальная газовая постоянная, R = 8,31 Дж/(К·моль).

На рис. 6 представлены обработанные с использованием уравнения (4) результаты наших экспериментов. Штриховая линия соответствует растрескиванию ПК без тестовой жидкости [20]. Контакт поверхности образцов с исследованными тестовыми жидкостями заметно ускоряет процесс растрескивания.

Анализ этих данных показал, что в сравнении со штриховой линией, описывающей растрескивание ПК без тестовой жидкости, у полученных нами зависимостей $\tau_{cf} = f(\sigma)$, описывающих растрескивание ПК образцов в контакте с тестовыми жидкостями, изменяется не только положение линий относительно оси τ_{cf} , но и их наклон к оси σ . Имея экспериментально полученные линейные зависимости $\tau_{cf} = f(\sigma)$, можно рассчитать коэффициенты уравнения (4):

$$E_{c} = RT \ln \frac{\tau_{c}}{\tau_{0}}, \text{при } \sigma = 0$$
 (5)

$$\alpha = -RTtg\theta \tag{6}$$

где $tg\theta$ – тангенс угла наклона прямых линий τ_{cf} = $f(\sigma)$ на рис. 6 к оси σ .

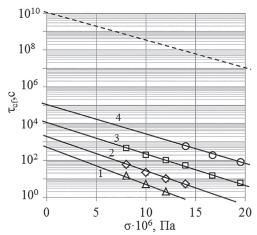


Рис. 6. Зависимость времени начала растрескивания от приложенного к образцу напряжения в полулогарифмических координатах (штриховая линия соответствует растрескиванию ПК без тестовой жидкости). Содержание толуола в тестовых жидкостях на основе пропанола составляло: 1-75%, 2-50, 3-25, 4-10%.

Зависимость $\tau_c = f(\sigma)$ растрескивания монолитного листового ПК без контакта с тестовыми жидкостями была проанализирована ранее [20, 21]. Структурный коэффициент α составил при этом 0,00087 м³/моль, а величина энергии активации растрескивания $E_c = 130-135$ кДж/моль. Снижение E_c по сравнению с указанной выше $E_{\rm TД}$, равной 150–160 кДж/моль [25, 26], можно связать с влиянием термоокислительной и гидролитической деструкции поликарбоната (для приближения условий испытаний к условиям эксплуатации образцы перед испытанием при 20° С не сушили).

Для растрескивания образцов в контакте с адсорбционно-активной тестовой жидкостью уравнение (4) можно записать в следующем виле:

$$\tau_{cf} = \tau_0 exp(\frac{E_{cf} - \alpha_f \sigma}{RT})$$
 (7

где $\tau_{\rm cf}$ – время (c) до начала растрескивания в контакте с тестовой жидкостью при напряжении σ (Па) и температуре $T=293~{\rm K};$ $E_{\rm cf}$ – энергия активации растрескивания ПК в контакте с тестовой жидкостью, связанная с прочностью химических связей поликарбоната ($E_{\rm cf}$ составила 95–105 кДж/моль в зависимости от состава тестовой жидкости на рис. 7а), α – структурно-чувствительный параметр – в данном случае зависит от состава ($\alpha_{\rm f}=0,00093$ –0,00105 м 3 /моль на рис. 7б).

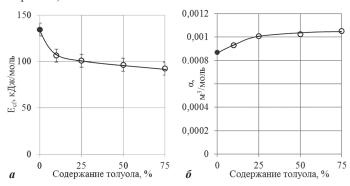


Рис. 7. Влияние состава тестовой смеси пропанола и толуола на величины коэффициентов уравнения (7): $E_{\rm cf}$ (а) и $\alpha_{\rm f}$ (б) (черные точки соответствуют значениям, полученным при испытании без тестовой жидкости).

Указанная на рис. 7а погрешность $E_{\rm cf}$ учитывает, в том числе, различные значения прогнозируемого времени τ_0 в диапазоне от 10^{12} до 10^{14} с. Отметим, что величина τ_0 не влияет на расчетные величины $\alpha_{\rm f}$ (τ_0 сокращается при делении). Для анализа представленных выше результатов можно использовать несколько возможных механизмов воздействия тестовых смесей пропанола и толуола на

напряженный поликарбонат. Так, для описываемой уравнением (7) модели в качестве основной причины ускорения растрескивания поликарбонатных образов можно считать эффект Ребиндера. При таком подходе коэффициенты уравнения (7): $E_{\rm cf}$ и $\alpha_{\rm f}$ – это энергия активации и активационный объем зарождения микротрещин соответственно. Контакт с тестовой адсорбционно-активной жидкой средой приводит к снижению поверхностной энергии и уменьшению величины $E_{\rm cf}$. Одновременно растет активационный объем $\alpha_{\rm f}$, что также имеет физический смысл. Данные, представленные на рис. 76, можно пересчитать в условные объемы υ в нм³ элементарных актов зарождения субмикротрещин, разделив величины коэффициентов $\alpha_{\rm f}$ на число Авогадро $N_{\rm A}=6,022\cdot10^{23}$ моль $^{-1}$:

$$v = \alpha/N_A, HM^3 \tag{8}$$

Результаты расчета представлены на рис. 8.

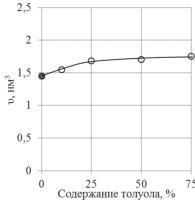


Рис. 8. Влияние состава тестовой смеси пропанола и толуола на величину объема v в уравнении (8).

Можно сделать вывод, что объемы υ , равные 1,5-1,75 нм³, соответствуют размерам неких напряженных межмолекулярных областей. Эти объемы изменяются мало, и влияние коэффициента $\alpha_{\rm f}$ на процесс растрескивания незначительно. В этом случае основную роль играет снижение энергии активации процесса растрескивания $E_{\rm cf}$.

Другой подход к описанию процесса растрескивания может быть связан с локальным увеличением напряжения за счет усадочных явлений, связанных с испарением тестовой жидкости. Именно с этим было связано появление трещин на образцах на рис. 1а. Можно, как и ранее, считать, что эффект Ребиндера снижает величины $E_{\rm cf}$, но не влияет на величину $\alpha_{\rm f}$. В этом случае локальное напряжение в месте растрескивания увеличивается за счет усадочного напряжения ($\sigma_{\rm y}$), возникающего при испарении тестовой жидкости. Это соответствует данным, представленным на рис. 1, так как удаление толуола из поликарбоната должно приводить к локальной усадке материала. Приняв коэффициент $\alpha_{\rm f}$ равным α из уравнения (4), можно записать:

$$au_{cf} = au_0 exp(rac{E_{cf} - lpha(\sigma + \sigma_y)}{RT})$$
, тогда $rac{\sigma_y}{\sigma} = (rac{lpha_f}{lpha} - 1)$

где σ_y – дополнительное локальное усадочное напряжение, возникающее при испарении тестовой жидкости. Результаты пересчета приведены на рис. 9.



Рис. 9. Влияние состава тестовой смеси пропанола и толуола на величины σ_V/σ в уравнении (9).

Рост содержания толуола в смеси с пропанолом на рис. 9 вызывает, в соответствии с уравнением (9), рост напряжения σ за счет σ_y на 5–20%. Хотя это может вносить свой вклад в ускорение процесса растрескивания поликарбоната, однако вклад невелик. Это не позволяет, как и ранее, считать данный механизм основным.

Рассмотрим третий возможный механизм, при котором ускорение растрескивания образцов однозначно связано с возникновением усадочных напряжений при высыхании тестовой жидкости. В этом случае уравнение (9) принимает вид:

$$\tau_{cf} = \tau_0 exp(\frac{E_c - \alpha(\sigma + \sigma_y)}{RT})$$
 (10)

Пересчет экспериментально полученных (рис. 6) зависимостей $\tau_{cf} = f(\sigma)$ с использованием этой модели в соответствии с уравнением (10) позволил определить расчетные значения этих возможных «усадочных напряжений». Указанные на рис. 10 времена сравнения выбраны в диапазоне от 1 до 1000 с, что соответствует реальным временам растрескивания τ_{cf} .

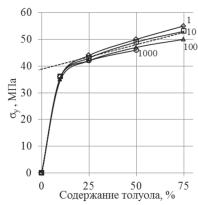


Рис. 10. Влияние состава тестовой смеси пропанола и толуола на величину σ_y в уравнении (10) (числа у кривых соответствуют временам растрескивания в секундах на рис. 6). Пунктирная линия соответствует средним значениям σ_y .

Увеличение содержания толуола в смеси с пропанолом вызывает рост напряжения $\sigma_{\rm y}$ при постоянстве коэффициента α . Это делает уравнение (10) более универсальным. Однако расчетные значения «усадочных напряжений» настолько велики (например, для тестовой смеси пропанола с 25% толуола это расчетное «напряжение» составляет 48 МПа), что без дополнительных экспериментов, подтверждающих эти значения $\sigma_{\rm y}$, нельзя считать указанный подход единственным. Также следует отметить, что растрескивание образцов часто (особенно при малых временах) начиналось без заметного испарения и уменьшения размеров капель. Правильным будет считать, что реальный процесс растрескивания монолитного напряженного поликарбоната при воздействии на его поверхность адсорбционно-активных жидких сред является многофакторным, и на его результат оказывают влияние все рассмотренные выше факторы.

Заключение

Исследовано влияние контакта тестовой смеси толуола с пропанолом-1 в широком диапазоне составов на процесс растрескивания листового поликарбоната, находящегося под действием внешнего механического напряжения. Показано, что зависимость времени растрескивания от напряжения может быть описана уравнениями, аналогичными уравнению Журкова, в котором величины коэффициентов зависят от соотношения компонентов смеси. Сделан вывод о многофакторности влияния исследованных тестовых жидких смесей на процесс растрескивания поликарбоната.

Работа выполнена при поддержке государственной субсидии (базовая часть) № 496332017/54 от 1.02.2017 г.

Литература

1. Бажева Р.Ч., Башоров М.Т., Хараев А.М., Микитаев А.К. Листовой атмосферостойкий светопрозрачный поликарбонат — новый материал авиационного остекления. — М.: Все материалы. Энциклопедический справочник 2017. № 4. С. 28–33.

- 2. Америк В.В., Радзинский С.А., Золкина И.Ю. и др. Поликарбонат анализ рынка и перспективы развития. // Пластические массы. 2013. \mathbb{N} 11. С. 10–13.
- 3. Гудимов М.М., Перов Б.В. Органическое стекло М.: Химия. 1981. 215 с.
- Гудимов М.М. Образование неориентированных трещин серебра в органическом стекле под действием внутренних растягивающих напряжений. // Авиационная промышленность. 1997. № 5-6. 13 с.
- Гудимов М.М. Трещины серебра на органическом стекле. М.: Изд. ЦИПКК АП. 1997. 260 с.
- 6. Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Климова С.Ф., Богатов В.А. Новые «серебростойкие» органические стекла. // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 4. С. 45–48.
- Исаенкова Ю.А., Мекалина И.В., Айзатулина М.К., Сентюрин Е.Г. Исследование влияния эксплуатационных воздействий на свойства поликарбоната для деталей авиационного остекления. / В сб. Материалы остекления в авиационной промышленности. ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ. 2016. С.11.
- Ефимов А.В., Щерба В.Ю., Бакеев Н.Ф. Структурные параметры микротрещин, образующихся при растяжении поликарбоната на воздухе и в жидкой среде. // Высокомолек. Соед. Б. 1989. Т.31. № 11. С. 715–718.
- 9. Власов С.В., Марков А.В. Ориентационные явления в процессах переработки полимерных материалов. М.: Изд. МИТХТ. 2014. 138 с.
- 10. Чернышев Г.Н. и др. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука, 1996. 239 с.
- 11. Шарафутдинов Г.З., Мартынова Е.Д. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2011. 28 с.
- 12. Герасимов С.В. Применение метода фотоупругости для анализа остаточных напряжений в поликарбонатных дисках. // Прикладная механика и техн. физика. 2004. Т. 45. № 3. С. 176–180.
- Gerasimov S.I. Photoelastic method for analyzing residual stresses in compact disks. // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2004. Vol. 45, No 3. P. 453–456.
- 14. Ke J., Ma Y., Zhao C. Measurement of residual stresses by modern optical methods. // Proc. SPIE. 1985. Vol. 599. P. 216–223.
- Pechersky M.J., Miller R.F., Vikram C.S. Residual stress measurement with laser speckle correlation interferometry and local heat treating. // Opt. Eng. 1995. Vol. 34. No.10. P. 2964–2971.
- Vikram C.S., Pechersky M.J., Feng C., Engelhaupt D. Residual stress analysis by local laser heating and speckle correlation interferometry. // Exp. Techniques. 1996. Vol. 20. No. 6. P. 27–30.
- 17. ГОСТ 12020. Методы определения стойкости к действию химических сред.
- 18. Сентюрин Е.Г., Гудимов М.М., Руднев В.П., Тригуб Т.С., Куклина Л.С. Старение органического стекла // Авиационная промышленность. 1993. № 5–6.
- 19. Руководство по практической работе компании EVONIK-RÖHM GmbH. 2011. С. 7. (http://orgsteklo-shop.ru/articles/)
- 20. Марков А.В., Семеняк П.А. Растрескивание листового монолитного поликарбоната в напряженном состоянии // Тонкие химические технологии. 2018. Т. 13. № 3. С. 72.
- 21. Марков А.В., Дериволков Д.И., Дуванов Д.С. Исследование напряженного состояния и оценка остаточных напряжений в термодеформированном листовом поликарбонате / Пластические массы. 2019. № 3–4. С. 21–24.
- 22. ТУ 2631-065-44493179-01 с изм. 1 Толуол (метилбензол) ХЧ.
- 23. ТУ 2632-106-4449379-07 Пропанол (пропиловый спирт) ХЧ.
- 24. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. М.: Лабиринт. 1994. 367 с.
- 25. Смирнова О.В., Ерофеева С.Б. Поликарбонаты. М.: Химия. 1975. 288 с.
- 26. Задорина Е.Н., Вишневский Г.Е., Зеленев Ю.В. О релаксационной природе процессов термической деструкции полимеров. // Высокомолек. соед. 1981. Т. A23, № 5. С. 1159–1165.