# СИНТЕЗ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

УДК 678.674:679.7.022.45

# РАСТРЕСКИВАНИЕ ЛИСТОВОГО МОНОЛИТНОГО ПОЛИКАРБОНАТА В НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

## А.В. Марков@, П.А. Семеняк

МИРЭА — Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия <sup>®</sup>Автор для переписки, e-mail: markov@mirea.ru

В работе исследовался процесс растрескивания листового монолитного поликарбоната, ускоренный воздействием внешнего напряжения. Растрескивание поликарбонатных органических стекол при эксплуатации, приводящее к падению ударной прочности и прозрачности, является их главным недостатком. Основную роль в ускорении процесса растрескивания играют напряжения, возникающие при их формовании и монтаже. Целью данной работы являлось исследование зависимости времени начала растрескивания от величины напряжения, приложенного к листовому монолитному поликарбонату. Это делает возможным прогнозирование срока службы поликарбонатных изделий. Эксперименты проводились на воздухе и в контакте с адсорбционно-активной средой (смесью толуола и н-пропанола). Приложенные к образцам напряжения изменялись в диапазоне от 25 до 55 МПа.

Показано, что зависимость времени начала растрескивания поликарбоната от величины приложенного напряжения может быть описана известным экспоненциальным уравнением Журкова. Рассчитаны коэффициенты этого уравнения для процессов растрескивания на воздухе и в контакте с адсорбционно-активной жидкостью. Установлено, что величина энергии активации процесса растрескивания поликарбоната (129.5 кДж/моль) близка по величине энергии активации термоокислительной деструкции (около 145-155 кДж/моль). В контакте с адсорбционно-активной смесью толуола (25% мас.) и н-пропанола величина энергии активаций растрескивания снижается до 99.5 кДж/моль. Одновременно структурный коэффициент в уравнении Журкова («активационный объем») увеличивается с 1.45 до 2.45 нм³.

Анализ полученных результатов позволил сделать прогноз о сроках эксплуатации листов монолитного поликарбоната и изделий из них при различных действующих напряжениях.

**Ключевые слова:** поликарбонатный лист, напряжение, растрескивание, уравнение Журкова, толуол, н-пропанол.

**Для цитирования:** Марков А.В., Семеняк П.А. Растрескивание листового монолитного поликарбоната в напряженном состоянии // Тонкие химические технологии / Fine Chemical Technologies. 2018. Т. 13. № 3. С. 72-78.

# CRACKING OF MONOLITHIC POLYCARBONATE SHEETS IN A STRESSED STATE

## A.V. Markov<sup>®</sup>, P.A. Semenyak

MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

@Corresponding author e-mail: markov@mirea.ru

The accelerated stress cracking of monolithic polycarbonate sheets was investigated. Cracking of polycarbonate organic glasses during operation leading to a drop in impact strength and transparency is their main disadvantage. The main role in the acceleration of the process of cracking is played by the stresses that arise when they are formed and mounted. The aim of this work was to investigate the dependence of the cracking start time on the stress applied to the sheet monolithic polycarbonate. This makes it possible to predict the lifetime of polycarbonate products. The experiments were carried out in air and in contact with an adsorption-active medium (a mixture of toluene and n-propanol). The stresses applied to the samples varied in the range from 25 to 55 MPa.

It is shown that the dependence of the cracking start time of a polycarbonate on the applied stress can be described by Zhurkov exponential equation. The coefficients of this equation for the processes of cracking in air and in contact with the adsorption-active liquid are calculated. It is established that the activation energy of the polycarbonate cracking process (129.5 kJ/mol) is close in magnitude to the activation energy of the thermal-oxidative destruction (about 145-155 kJ/mol). In contact with the adsorption-active mixture of toluene (25% mass.) and n-propanol, the activation energy of the cracking is reduced to 98.5 kJ/mol. At the same time, the structural coefficient in the Zhurkov equation ("activation volume") increases from 1.45 to 2.45 nm³.

The analysis of the obtained results made it possible to predict the lifetime of monolithic polycarbonate sheets and products made of them at various operating stresses.

Keywords: polycarbonate sheet, stress cracking, Zhurkov equation, toluene, n-propanol.

**For citation:** Markov A.V., Semenyak P.A. Cracking of monolithic polycarbonate sheets in a stressed state. *Tonkie khimicheskie tekhnologii / Fine Chemical Technologies.* 2018; 13(3): 72-78. (in Russ.)

#### Введение

Появление микротрещин в органических стеклах при формовании, хранении и эксплуатации не только ухудшает прочностные характеристики изделий, но и снижает их прозрачность [1–3]. Это явление является серьезным недостатком изделий из листового монолитного поликарбоната (ПК), применение и мировое производство которого устойчиво растет, в том числе для остекления, и в настоящее время превышает 3.5 млн. тонн в год. В России листы и изделия из них составляют в структуре потребления ПК более 80% [4].

Процесс растрескивания оргстекол протекает в несколько стадий. На начальных стадиях растрескивания возникают нанотрещины размером менее 100 нм, не видимые глазом. Они не нарушают полностью целостность материала, но если продолжают расти, то превращаются в микротрещины или «крейзы» размером в несколько сотен микрометров. С этим связан оптический эффект «синевы» вследствие отражения света от возникающих микроповерхностей на границах воздух—полимер. Дальнейший рост микротрещин приводит к формированию макротрещин (трещин «серебра»), видимых невооруженным глазом, благодаря увеличению зеркальных поверхностей отражения. Этот этап растрескивания оргстекол заканчивается разрушением материала.

Процессы, связанные с растрескиванием органических стекол из полиметилметакрилата (ПММА), используемого с 40-ых годов прошлого века, достаточно хорошо исследованы [1, 2], чего нельзя сказать об органических стеклах из ПК. Эти исследования

показали, что главной причиной явления растрескивания органических стекол являются напряжения: «внешние» механические, возникающие в изделиях из них при монтаже, и остаточные («внутренние») напряжения, которые возникают в них при формовании заготовок и изделий.

Возникновению первичных нанотрещин предшествуют радикальные процессы разрыва молекул полимера вследствие термоокислительной деструкции. Именно рост их числа и размеров до мактротрещин приводит к разрушению изделия. Очевидно, что времена начала растрескивания могут быть связаны с действующим напряжением уравнением Журкова для времен долговечности (разрушения) полимеров [5–7]. Поэтому аналогичное уравнение может быть применено и для описания процесса начала растрескивания – крейзообразования (т<sub>.</sub>):

$$\tau_c = \tau_0 e^{\frac{U_c - \alpha \sigma}{RT}} \tag{1}$$

где  $\tau_0$  – постоянная, связанная с частотой колебаний атомов молекул в тепловом движении,  $\tau_0=10^{-13}$  с; T – температура, K; R – универсальная газовая постоянная, R=8.31 Дж/(моль·K);  $\alpha$  – структурно-чувствительный параметр («активационный объем»), м³/моль;  $U_c$  – энергия активации процесса растрескивания, Дж/моль. Энергия активации растрескивания определяется прочностью химических связей полимера, как и энергии термоокислительной деструкции макромолекул  $U_{\tau o}$ , которая для поликарбоната составляет 140-155 кДж/моль [8, 9]. Энергия

напряжения, равная ασ (Дж/моль), способствует разрыву молекул и ускоряет растрескивание.

Существует и эмпирический подход к описанию процесса растрескивания, предложенный Гудимовым, который предложил использовать для описания зависимости времени растрескивания ( $\tau_c$ ) полиакрилатных оргстекол от действующего напряжения степенной закон [2]:

$$\tau_c = \theta \sigma^{-\gamma} \tag{2}$$

Эмпирические коэффициенты  $\theta$  и  $\gamma$  определяются на основе экспериментальных данных.

Целью данной работы являлось исследование зависимости времени начала растрескивания от величины напряжения, приложенного к листовому монолитному поликарбонату, для ее использования при прогнозировании срока службы ПК-изделий без растрескивания.

## Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования использовали образцы, вырезанные из листа монолитного бесцветного светостабилизированного поликарбоната Novattro производства ООО «СафПласт», Казань (ТУ 2246-03-81057157-2008). Образцы пластины толщиной  $3.0\pm0.1$  мм и шириной  $30\pm1$  мм вырезали вдоль направления экструзии листа.

Нагружение образцов проводили с использованием универсальной испытательной машины GoTechAL-7000 LA5 с приставкой для горизонтального деформирования образцов. Эта установка автоматически поддерживала постоянство напряжения после нагружения образца. Тензометрическая система универсальной испытательной машины позволяла проводить параллельное измерение нагрузки (P, H) и деформации ( $\varepsilon = l/l_0 - 1$  в относительных единицах) с выводом информации на монитор компьютера. Деформация не превышала 5%. Зафиксированная в процессе испытания образцов нагрузка автоматически пересчитывалась в истинное напряжение ( $\sigma$ , МПа) по формуле:

$$\sigma = P(1+\varepsilon)/s_0 \tag{3}$$

где  $s_0$  — начальное поперечное сечение образца, м². Скорость деформирования составляла 1 %/с, что соответствовало скорости нагружения образца приблизительно 1  $\Pi$ a/c.

Для фиксации момента появления микротрещин в нагруженных образцах (освещенных под углом 45°) использовалась цифровая фотокамера Nikon с микрообъективом, настроенная на автома-

тическую периодическую фиксацию изображений через заданные промежутки времени (от 1 с) с использованием специального программного обеспечения.

По рекомендации одного из производителей аналогичных поликарбонатных листов EVONIK-RÖHM GmbH для оценки влияния адсорбционно-активной среды использовали методику смачивания образцов тестовой смесью *н*-пропанола (х.ч., ТУ 6-09-402-87) с 25% мас. толуола (х.ч., ТУ 2631-065-44493179-01). По данной методике допустимое время до начала растрескивания листового монолитного ПК при контакте с этой тестовой жидкостью не должно превышать 3 мин (180 с)<sup>1</sup>.

Использованная тестовая смесь толуола и *н*-пропанола наносилась на внешнюю светостабилизированную поверхность центральной части исследуемого образца на расстоянии не менее 5 мм от его краев (попадание тестовой смеси на края приводила к ускоренному росту краевых трещин). Для устранения испарения компонентов тестовой жидкости смоченная поверхность накрывалась прозрачным покровным стеклом. Появление микротрещин фиксировалось, как было описано выше.

#### Результаты и их обсуждение

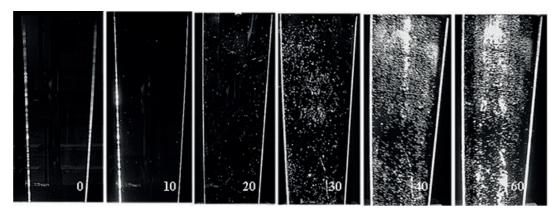
Существуют различные методики оценки уровня напряжений в органических стеклах, [3]. Например, оптико-поляризационные методы анализа напряженного состояния прозрачных полимерных изделий [10], в том числе по величине двойного лучепреломления [7, 11]. Исследование интерференционных изображений изделий в скрещенных поляроидах позволяет оценить напряженное состояние в целом, но эти методику можно считать количественной только для ПК-лазерных дисков [12–14].

В ряде методик используются испытания, дозированно ускоренные механо-термическим воздействием [15, 16], но эти методики требуют сложного и дорогого оборудования. Также рекомендуется использовать ускоряющее воздействие адсорбционно-активных сред (эффект Ребиндера) [17, 18]. Последний подход нашел применение как для полиакрилатных, так и для ПК-оргстекол и изделий из них. Мы выбрали именно этот метод, так как он моделирует реальный процесс растрескивания.

Возникающие микротрещины (крейзы) при освещении под углом 45° выглядят, как яркие штрихи. В качестве примера на рис. 1 приведен набор фотографий образцов, полученных при различных временах нагружения при напряжении, в образце ПК, равном 47 МПа.

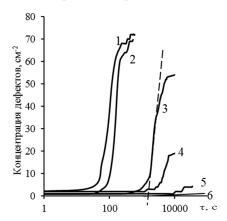
<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Руководство по практической работе компании EVONIK-RÖHM GmbH. 2011 P. 7. http://orgsteklo-shop.ru/articles/.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>ГОСТ 12020-1972. Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред.



**Рис. 1.** Фотографии образцов поликарбоната при различных временах (цифры в мин на фотографиях) нагружения при напряжении 47 МПа. Сужение изображений образцов связано с расположением объектива фотокамеры под углом 45°.

Результаты подсчета количества этих дефектов на  $1 \text{ cm}^2$  поверхности нагруженного образца ( $N_c$ ) приведены на рис. 2. Стадии процесса растрескивания в полулогарифмических координатах проявляются более четко.



**Рис. 2.** Зависимость количества микротрещин на образцах от времени выдержки под нагрузкой: 1-57 МПа; 2-52 МПа; 3-47 МПа; 4-43 МПа; 5-40 МПа, 6-35 МПа.

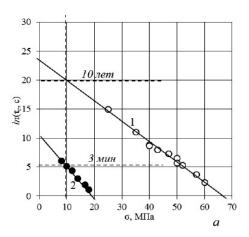
На кривых, описывающих зависимости  $N_{\varepsilon}$  от продолжительности нагружения, можно выделить три области, различающиеся скоростями роста  $N_c$ . Первую стадию растрескивания при малых временах нагружения (на рис. 2 граница этой области при напряжении 47 МПа обозначена касательной у кривой 3) можно охарактеризовать как индукционный период (включая возникновение невидимых нанотрещин). Небольшое количество видимых микротрещин на этой стадии возникают в местах, где дефекты уже присутствовали в ненагруженных образцах, а нагружение их лишь выявило, вследствие их размеров. На второй стадии растрескивания рост  $N_c$  ускоряется, то есть появляются новые микротрещины в местах активирования напряжением дефектов. Затем на третьей стадии рост  $N_c$  замедляется, однако при этом рост размеров имеющихся микротрещин продолжается. Аналогичный характер имеют зависимости при других напряжениях. Предельные значения  $N_c$  микротрещин на третьей стадии растрескивания снижаются с уменьшением напряжений. Это можно объяснить увеличением доли «неактивированных» при невысоких напряжениях дефектов в материале. По нашему мнению, подобные данные можно использовать для анализа содержания различных по опасности исходных дефектов (спектров дефектности) для сравнения различных видов оргстекол.

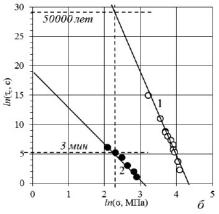
Анализ полученных зависимостей  $N_c = f(\tau)$  позволяет определить точки пересечения касательных к линиям первой и второй стадий как времен начала растрескивания образцов ( $\tau_c$ ). Полученные данные были обработаны с использованием приведенных выше уравнения (1) Журкова и уравнения (2) Гудимова. Графически обработанные с использованием уравнения (1) результаты эксперимента в полулогарифмических координатах  $In\tau_p = f(\sigma)$  представлены на рис. 3a (кривая 1):

$$ln\tau_c = \left(ln\tau_0 + \frac{U_c}{RT}\right) - \frac{\alpha}{RT}\sigma , \qquad (4)$$

где обозначения соответствуют обозначениям в уравнении (1). Видно, что экспериментально полученные значения  $\tau_c = f(\sigma)$  достаточно хорошо ложатся на прямую линию, соответствующую уравнению (4). Это можно считать очередным подтверждением активационного характера процесса растрескивания ПК и позволяет оценить величины коэффициентов этого уравнения.

В свою очередь, знание этих коэффициентов (таблица) позволяет рассчитывать времена начала растрескивания ПК при меньших действующих напряжениях и спрогнозировать, в течение какого времени изделия из ПК могут эксплуатироваться под действием известного напряжения без растрескивания. Экстраполяция линии тренда экспериментальной зависимости на рис. За дает «разумные» значе-





**Рис. 3.** Экспоненциальная (*a*) и степенная (*б*) зависимости времени начала растрескивания ( $\tau_c$ ) образцов поликарбоната от действующего напряжения ( $\sigma$ ) на воздухе (1) и в контакте с тестовой адсорбционно-активной смесью толуола (25%) и *н*-пропанола (75%) (2).

ния напряжений и времен. Например, при величине действующего напряжения 10 МПа прогнозируемый срок эксплуатации листового ПК составляет 10 лет.

На рис. 36 (кривая 1) те же результаты представлены в степенном виде, где обозначения соответствуют обозначениям в уравнении (2):

$$ln\tau_c = ln\theta - \gamma ln\sigma \tag{5}$$

Экспериментально полученные зависимости  $\tau_c = f(\sigma)$  в этих координатах имеют тенденцию к отклонению от линейности и замедлению роста  $\tau_c$  при

снижении  $\sigma$ , а экстраполяция линии тренда экспериментальной зависимости на рис. Зб уходит в столетия даже при высоких напряжениях (16-17 МПа). Такой прогноз явно преувеличен.

Аналогичные исследования были проведены с нагруженными образцами, находящимися в контакте с адсорбционно-активной смесью толуола и n-пропанола (зависимости 2 на рис. 3a и  $3\delta$ ). В этом случае использование экспоненциальной зависимости также является более корректным. В таблице приведены значения коэффициентов экспоненциального уравнения (1), рассчитанные для линий тренда зависимостей, представленных на рис. 3a.

Значения коэффициентов экспоненциального уравнения (1)

Условия испытания (среда)	$U_c$ , кДж/моль	$U_{\text{то}}^{*}$ , кДж/моль	$\alpha$ , м <sup>3</sup> /моль	α, HM <sup>3</sup>	σ <sub>p</sub> **, ΜΠα	σ <sub>10</sub> ***, ΜΠα
Воздух (1)	129.5	140-155	9.0·10-4	1.5	62-63	63.5
Тестовая жидкость (2)	99.5	_	14.5·10-4	2.45	_	19.5

<sup>\*</sup> по данным [8, 9];

Как и следовало ожидать, величина  $U_c$  для ПК оказалась меньше величины энергии активации его термоокислительной деструкции  $(U_{\tau o})$ . Интересно, что экспериментальное значение прочности при растяжении  $\sigma_p$ , при котором начало растрескивания практически совпадает с разрушением образца, близко по значению к величине напряжения  $(\sigma_{10})$ , полученной экстраполяцией линии тренда зависимости (1) к времени нагружения образцов при используемой скорости 1 МПа/с до момента его разрушения  $(\sim 10 \text{ c})$ .

Контакт с адсорбционно-активной жидкостью снижает величину  $U_c$  с 130 до 100 Дж/моль. Это можно считать следствием снижения поверхностной энергии при возникновении и росте микротрещин и проявлением эффекта Ребиндера. Одновременно адсорбцион-

но-активная жидкость увеличивает «активационный объем» при растрескивании ПК в напряженном состоянии ( $\alpha$ ) от 1.45 до 2.45 нм<sup>3</sup>. Отметим, что при увеличении содержания толуола в смеси с n-пропанолом величина «активационного объема» растрескивания»  $\alpha$  продолжает расти. Так, при контакте образцов с чистым толуолом  $\alpha$  составляет уже 3.45 нм<sup>3</sup>.

Если принять экспоненциальную зависимость (по Журкову) как корректно описывающую процесс растрескивания напряженного монолитного ПК, то предлагаемая производителем методика оценки качества листового монолитного ПК [18] с использованием тестовой смеси толуола и *н*-пропанола указывает на отсутствие в образце напряжений выше ~10 МПа (кривая 2 и штриховые линии на рис. 3*a*).

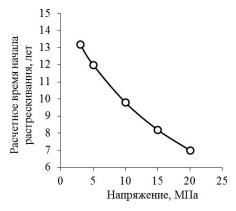
<sup>\*\*</sup> экспериментальное значение прочности при растяжении, определенное по ГОСТ 11262-80, при котором начало растрескивания сопровождается разрывом образца;

<sup>\*\*\*</sup> расчетное значение напряжения  $\sigma_{10}$  при  $\tau_{c} = 10$  с, равном времени нагружения до  $\sigma_{p}$ .

То есть отсутствие растрескивания ПК при контакте с указанной выше тестовой жидкостью в течение 3 мин свидетельствует о том, что напряжения в нем не превышают 10 МПа. Важно, что сопоставление зависимостей 2 и 1 на рис. 3a позволяет сделать вывод о том, что при напряжении, равном  $\sim$ 10 МПа (кривая 1 и штриховые линии на рис. 3a), время растрескивания составит 10 лет. Это время обычно указывается производителями монолитного ПК и изделий из него в качестве гарантийного срока службы.

Используя полученные коэффициенты уравнения (1), можно рассчитать времена начала растрескивания ПК при различных действующих напряжениях.

На рис. 4 приведены результаты этих расчетов в виде зависимости, позволяющей, задав величину действующего напряжения, оценить срок эксплуатации листового ПК. Наоборот, задав гарантийный срок службы, можно оценить допустимый уровень действующего напряжения в ПК.



**Рис. 4.** Зависимость прогнозируемой продолжительности эксплуатации листового монолитного поликарбоната без растрескивания от величины действующего напряжения.

Может возникнуть вопрос, корректно ли использовать результаты испытаний, проведенных в закрытом помещений при нормальных условиях, для прогнозирования поведения ПК-листов и изделий из них на открытом воздухе при воздействии солнечного

#### Список литературы:

- 1. Гудимов М.М., Перов Б.В. Органическое стекло. М.: Химия, 1981. 215 с.
- 2. Гудимов М.М. Образование неориентированных трещин серебра в органическом стекле под действием внутренних растягивающих напряжений // Авиационная промышленность. 1997. № 5-6. С. 43–47.
- 3. Гудимов М.М. Трещины серебра на органическом стекле. М.: Изд-во ЦИПКК АП, 1997. 260 с.
- 4. Америк В.В., Радзинский С.А., Золкина И.Ю., Симонов-Емельянов И.Д. Поликарбонат анализ рынка и перспективы развития // Пластические массы. 2013.  $\mathbb{N}$  11. С. 10–13.

излучения, перепадах температур, ветровых и других нагрузках. По нашему мнению, это прогнозирование корректно. Во-первых, ПК-листы, в том числе исследованные нами, имеют защитный поверхностный слой, содержащий УФ-абсорберы в количествах, достаточных для защиты ПК от вредного воздействия солнечного излучения. Во-вторых, с учетом того, что средняя годовая температура в России ниже 20 °C (5-6 °C) можно предположить, что реальные сроки эксплуатации будут больше, чем приведенные на рис. 4. Однако учет этого фактора требует дополнительных исследований, так как изменение температуры может сопровождаться изменением «активационного объема» а. Наконец, увеличение действующего напряжения за счет ветровых нагрузок, осадков и других факторов должно быть учтено соответствующими расчетами, что является обычной практикой при проектировании строительных конструкций.

#### Заключение

Установлено, что зависимость времени растрескивания листового монолитного поликарбоната от приложенного к нему механического напряжения может быть описана экспоненциальным уравнением долговечности Журкова.

Рассчитаны коэффициенты этого уравнения. Величина энергии активации процесса растрескивания поликарбоната, равная 129.5 кДж/моль, оказалась близка к величине энергии активации процесса его термоокислительной деструкции, но меньше ее.

В контакте с адсорбционно-активной смесью толуола и *н*-пропанола процесс растрескивания поликарбоната ускоряется, что связано с уменьшением величина энергии активации до 98.5 кДж/моль и увеличением «активационного объема» с 1.5 до 2.45 нм<sup>3</sup>.

Анализ полученных результатов делает возможным прогнозирование поведения листового монолитного поликарбоната в нагруженном состоянии.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной субсидии (базовая часть) № 496332017/54 от 01.02.2017.

#### **References:**

- 1. Gudimov M.M., Perov B.V. Organic glass. Moscow: Khimiya Publ., 1981. 215 p. (in Russ.)
- 2. Gudimov M.M. Formation of undirected cracks in the organic glass under the influence of internal tensile stresses. *Aviatsionnaya promyshlennost'* = Aviation Industry. 1997; (5-6): 43-47 (in Russ.)
- 3. Gudimov M.M. Cracks on organic glass. Moscow: TsIPKK AP Publ., 1997. 260 p. (in Russ.)
- 4. Amerik V.V., Radzinsky S.A., Zolkina I.Yu., Simonov-Emelyanov I.D. Polycarbonate market analysis and development prospects. *Plastmassy* (Plastics). 2013; (11): 10-13 (in Russ.)

- 5. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 576 с.
- 6. Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. М.: Лабиринт, 1994. 368 с.
- 7. Власов С.В., Марков А.В. Ориентационные явления в процессах переработки полимерных материалов. М.: Изд-во МИТХТ, 2014. 138 с.
- 8. Задорина Е.Н., Вишневский Г.Е., Зеленев Ю.В. О релаксационной природе процессов термической деструкции полимеров // Высокомол. соедин. 1981. Сер. А. Т. 23. № 5. С. 1159–1165.
- 9. Смирнова О.В., Ерофеева С.Б. Поликарбонаты. М.: Химия, 1975. 288 с.
- 10. Шарафутдинов Г.З., Мартынова Е.Д. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. 28 с.
- 11. Князев В.С., Кононова И.Б. Руководство к лабораторным занятиям по общей петрографии. М.: Недра, 1991. 128 с.
- 12. Герасимов С.И. Применение метода фотоупругости для анализа остаточных напряжений в поликарбонатных дисках // Прикл. механика и техн. физика. 2004. Т. 45. № 3. С. 176–180.
- 13. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. 2002. № 16. 2002. С. 17–24.
- 14. Ke J., Ma Y., Zhao C. Measurement of residual stresses by modern optical methods // Proc. SPIE. 1985. V. 599. P. 216–223.
- 15. Pechersky M.J., Miller R.F., Vikram C.S. Residual stress measurement with laser speckle correlation interferometry and local heat treating // Opt. Eng. 1995. V. 34. № 10. P. 2964–2971.
- 16. Vikram C.S., Pechersky M.J., Feng C., Engelhaupt D. Residual stress analysis by local laser heating and speckle correlation interferometry // Exp. Techniques. 1996. V. 20. № 6. P. 27–30.
- 17. Petrie S.P., Dibenedetto A.T., Miltz J. The effects of stress cracking on the fracture toughness of polycarbonate // Polymer Eng. & Sci. 1980. V. 20. № 6. P. 385–392.
- 18. Hawinkels R.J.H. Fatigue crack propagation in polycarbonate. Eindhoven: Eindhoven Univ. of Technology Publ., 2011. 35 p.

- 5. Tager A.A. Physicochemistry of polymers. Moscow: Nauchny mir Publ., 2007. 576 p. (in Russ.)
- 6. Kuleznev V.N. Structure and mechanical properties of polymers. Moscow: Labirint Publ, 1994. 368 p. (in Russ.)
- 7. Vlasov S.V., Markov A.V. Orientational phenomena in the processing of polymeric materials. Moscow: MITHT Publ., 2014. 138 p. (in Russ.)
- 8. Zadorina E.N., Vishnevsky G.E., Zelenev Yu.V. About the relaxation nature of the processes of thermal destruction of polymers. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*. *Ser. A* = Polymer Science. Ser. A. 1981; 23(5): 1159-1165. (in Russ.)
- 9. Smirnova O.V., Erofeeva S.B. Polycarbonates. Moscow: Khimiya Publ., 1975. 288 p. (in Russ.)
- 10. Sharafutdinov G.Z., Martynova E.D. Polarization-optical method for studying stresses. Moscow: Lomonosov Moscow State University Publ., 2011. 28 p. (in Russ.)
- 11. Knyazev V.S., Kononova I.B. Manual for laboratory studies in general petrography. Moscow: Nedra Publ., 1991. 128 p. (in Russ.)
- 12. Gerasimov S.I. Photoelastic method for analyzing residual stresses in compact disks. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2004; 45(3): 453-456.
- 13. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M. Useful and dangerous residual stresses. *Priroda* (Nature). 2002; (16): 17-24. (in Russ.)
- 14. Ke J., Ma Y., Zhao C. Measurement of residual stresses by modern optical methods. *Proc. SPIE.* 1985; (599): 216-223.
- 15. Pechersky M.J., Miller R.F., Vikram C.S. Residual stress measurement with laser speckle correlation interferometry and local heat treating. *Opt. Eng.* 1995. 34(10): 2964-2971.
- 16. Vikram C.S., Pechersky M.J., Feng C., Engelhaupt D. Residual stress analysis by local laser heating and speckle correlation interferometry. *Exp. Techniques*. 1996; 20(6): 27-30.
- 17. Petrie S.P., Dibenedetto A.T., Miltz J. The effects of stress cracking on the fracture toughness of polycarbonate. *Polym. Eng. & Sci.* 1980; 20(6): 385-392.
- 18. Hawinkels R.J.H. Fatigue crack propagation in polycarbonate. Eindhoven: Eindhoven Univ. of Technology Publ., 2011. 35 p.

#### Об авторах:

**Марков Анатолий Викторович,** доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

**Семеняк Полина Александровна,** студент кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

#### About the authors:

**Anatoly V. Markov,** D.Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Chemistry and Technology of Plastics and Polymer Composites Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

**Polina A. Semenyak,** Student of the Chair of Chemistry and Technology of Plastics and Polymer Composites Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).