

Исследование физико-механических и оптических свойств ПММА при введении вторичного полимера

Екатерина М. Борисовская	¹	borisovskaya_e@mail.ru
Ольга В. Карманова	¹	karolga@mail.ru
Маргарита С. Щербакова	¹	schmstpp@yandex.ru
Виктор В. Калмыков	¹	kaftpp14@mail.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. Одним из основных представителей оптических пластиков является полиметилметакрилат – ПММА, характеризующийся хорошими технологическими свойствами при переработки методом литья под давлением. Изделия из ПММА обладают высокими конструкционными и внешневидовыми свойствами, а также светопропускной способностью до 92%, в результате производственных потерь образуются технологические отходы в виде отбракованных деталей и литников. Сложность использования вторичного полимера заключается в первую очередь в уменьшении светопропускания, а также в изменении межмолекулярных взаимодействий, возникающих при повторной термообработке вторичного полимера. В ходе работы были подобраны технологические параметры переработки ПММА с содержанием вторичного полимера до 30% в промышленных условиях методом литья под давлением на термопластавтомате DEMAGD-55 для получения стандартных образцов - лопатки, пластины и детали в виде ступеней разной толщины. В работе представлены результаты экспериментальных исследований изменения физико-механических и оптических показателей ПММА при введении вторичного полимера, также в данной работе исследованы основные технологические показатели – объемная и технологическая усадки, которые оказывают существенное влияние на конструкционные особенности изделия после охлаждения в пресс-форме. На втором этапе исследования изучено влияние содержания вторичного полимера на физико-механические и оптические показатели изделий из ПММА, представлены графические зависимости. Из полученных данных выявлено, что содержание вторичного полимера оказывает влияние на межмолекулярные связи и как следствие на плотность упаковки макромолекул. В ходе проведения спектрального анализа в УФ – области спектра и ИК – спектроскопии изучено влияние вторичного полимера на структурные изменения функциональных групп в макромолекуле ПММА.

Ключевые слова: полиметилметакрилат, литье под давлением, светопропускание, усадка, физико-механические показатели

The research physical-mechanical and optical properties of PMMA in with the addition secondary polymer

Ekaterina M. Borisovskaya	¹	borisovskaya_e@mail.ru
Olga V. Karmanova	¹	karolga@mail.ru
Margarita S. Shcherbakova	¹	schmstpp@yandex.ru
Viktor V. Kalmikov	¹	kaftpp14@mail.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Summary. One of the main representatives of optical plastics is polymethylmethacrylate – PMMA, characterized good technological properties when processed by method of injection molding. Products made of PMMA have high construction and surface appearance properties, and light transmission of up to 92%, as a result of production losses technological waste is generated in the form of reject of details and sprues. The complexity using recycled polymer is primarily in reducing the light transmission, as well as a change of intermolecular interaction, occurring during re-heat treatment secondary polymer. During the work of technological parameters been picked up recycling PMMA recycled content to 30% polymer in industrial conditions by injection molding on the molding machine DEMAG D-55 for standard samples – the blade in the form of varying degrees and details of the steps of varying thickness. In work results of experimental studies of changes in physico-mechanical and optical index PMMA with the introduction of the secondary polymer, in this paper we study basic technological parameters of bulk and technological that have a significant impact on the structural features of the product, after cooling in the mold. At the second stage of the study studied the influence of the content of the secondary polymer on the physico-mechanical and optical indicators are of products from PMMA, presented graphic dependences. From the data obtained revealed that the content of the secondary polymer influences the intermolecular bonds and as a consequence the packing density of the macromolecules. During carrying out the spectral analysis of UV-spectrum and IR-spectroscopy study the effect of of the secondary polymer on the structural changes of functional groups in the macromolecule PMMA.

Keywords: PMMA, injection molding, light transmission, shrinkage, physical and mechanical properties

Введение

С каждым годом потребность термопластов в России увеличивается на 15–20%. В первую очередь это относится к полимерам, обладающими хорошими оптическими свойствами, к таким как полиметилметакрилат (ПММА), поликарбонат (ПК), полистирол (ПС).

Для цитирования

Борисовская Е.М., Карманова О.В., Щербакова М.С., Калмыков В.В. Исследование физико-механических и оптических свойств ПММА при введении вторичного полимера // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 1. С. 264–270. doi:10.20914/2310-1202-2017-1-264-270

Органические полимерные материалы отличаются термопластичностью – способностью при нагревании переходить в вязкотекучее состояние, а при охлаждении сохранять приданную им форму. Поэтому применение светопрозрачных термопластических полимеров для изготовления оптических деталей позволяет использовать

For citation

Borisovskaya E.M., Karmanova O.V., Shcherbakova M.S., Kalmikov V.V. The research physical-mechanical and optical properties of PMMA in with the addition secondary polymer. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2017. Vol. 79. no. 1. pp. 264–270. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-1-264-270

высокопроизводительные методы [1]. Одним из перспективных направлений производства оптических деталей является использование метода литья под давлением, что обеспечивает получение высокоточных изделий, снижение трудоемкости в обработке изделий за счет уменьшения механической обработки деталей, а также снижение энергозатрат при изготовлении деталей из прозрачных полимеров.

Основным представителем прозрачных термопластов является полиметилметакрилат. Изделия из ПММА обладают хорошими внешневидовыми характеристиками – блестящей поверхностью, высокой твердостью, стойкостью к появлению царапин и главное, что определяет использование ПММА для оптических деталей его светопропускающая способность, которая достигает 92%. При этом существует возможность устранения дефектов в виде царапин на изделиях из ПММА путем их полировки. Изделия из ПММА могут эксплуатироваться в широком интервале температур от минус 50 °С до плюс 130 °С, сохраняют свои физико-механические и оптические свойства на достаточно высоком уровне. Благодаря химическому строению ПММА проявляет атмосферостойкость, имеет высокую химическую стойкость к различным агрессивным средам, УФ-стойкость и другим видам излучения [2]. Обладая уникальным комплексом технических свойств большинство потребителей во всем мире при производстве светотехнических и оптических изделий отдают предпочтение ПММА.

В настоящее время крупнейшими производителями ПММА являются зарубежные фирмы SHIMEI, Германия и EVONIC, Тайвань. Для большинства предприятий переработчиков полимеров в России актуальной является проблема использования вторичного ПММА при изготовлении оптических деталей, что обеспечит сокращение технологических отходов производства и уменьшение себестоимости изделий.

Материалы и методы

Целью работы явилось изучение возможности использования вторичного ПММА для изготовления оптических деталей и исследование физико-механических и оптических свойств композиций ПММА, содержащих вторичный полимер. В качестве объектов исследования выбраны промышленные марки: Acryrex-205 CM фирмы SHIMEI и Plexiglass-8N фирмы EVONIC. Основные характеристики данных марок приведены в таблице 1.

Таблица 1.
Основные характеристики промышленных марок ПММА

Table 1.
Basic characteristics of industrial makes of PMMA

Наименование показателей Thenameofindicators	Acryrex-205 CM	Plexi-glass-8N
Предел прочности при растяжении, МПа Tensilestrength, PMA	72,0	77,0
Относительное удлинение, % Relative extension, %	5,0	5,5
Светопропускание, % Light transmission, %	92,0	92,0
Ударная вязкость по Изоду, МПа при 23 °С Izod impact strength, MPa at 23 °C	2,0	2,0
Показатель текучести расплава, при 230 °С и 3,8 кг, г/10 мин Melt flow index, at 230 °C and 3,8 kg, g/10 m	1,8	3,6
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	1190	1190
Температура тепловой деформации, °С Heat distortion temperature, °C	100,0	103,0
Температура размягчения по Вика, °С Vicat softening temperature, °C	113,0	108,0

Для исследования физико-механических свойств были получены стандартные образцы в виде лопаток, ступеней и пластины методом литья под давлением на термопластавтомате DEMAGD-55 при следующих параметрах – температуре переработки 220–245 °С, давлении впрыска 94 МПа и скорости вращения шнека 14,5 об/мин.

Для изучения возможности использования вторичного полимера в составе оптических деталей в ПММА марки Acryrex-250 CM вводили вторичный полимер, полученный из отходов изделий в виде литников в количестве от 5 до 30%.

На первом этапе исследовали усадку изделий – основного критерия характеризующего геометрические размеры деталей сложной конфигурации с отверстиями, ребрами жесткости, уклонами, «бобышка» и другими элементами конструкции детали, к которым предъявляются требования к точности размеров. Известно, что изменение усадки может привести к несоответствию геометрических размеров деталей вследствие изменения объема материала и плотности расплава при переработке [3]. Технологическую усадку определяют как абсолютное или относительное уменьшение размеров

изделия по сравнению с соответствующими размерами оформляющей полости формы, происходящее ко времени охлаждения извлеченного из формы изделия до температуры окружающей среды (ГОСТ 18616-80):

$$MS = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где L_0 – размер формы, мм; L_1 – размер образца, мм

На рисунке 1 приведены зависимости технологической усадки ПММА от содержания вторичного полимера.

Анализ экспериментальных зависимостей ПММА показал, что содержание вторичного полимера на линейные размеры образцов изделий

не влияет. Для определения объемной усадки были использованы образцы в виде 3-х ступеней, разной толщины и, следовательно, объема.

Показатель определяли для каждой ступени отдельно, затем данные усреднялись по 3-м ступеням.

Объемную усадку рассчитывали по формуле [3]:

$$S_V = \frac{V_{MOLD} - V_{PART}}{V_{MOLD}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где V_{MOLD} – объем полости пресс-формы, мм³;

V_{PART} – объем изделия, мм³

Установлено, что с увеличением содержания вторичного полимера объемная усадка увеличивается (рисунок 2).

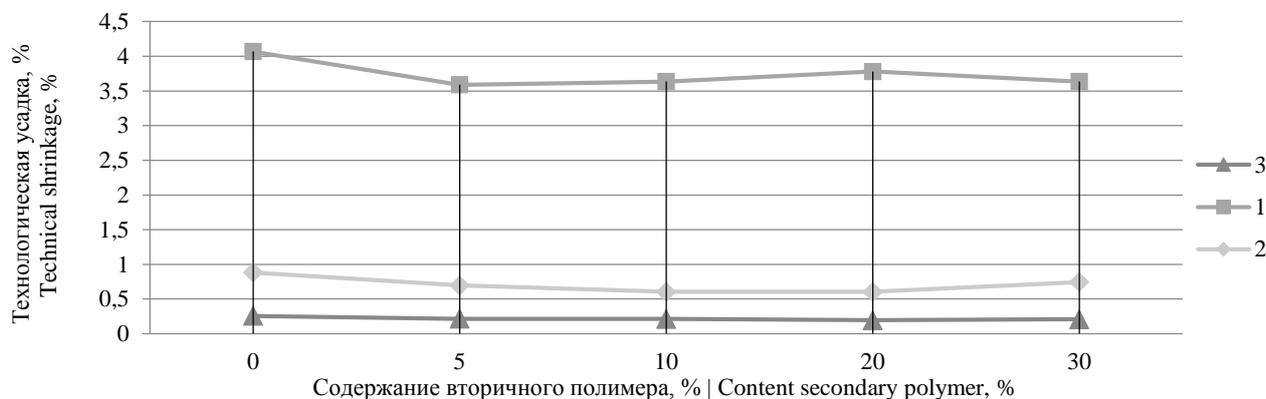


Рисунок 1. Зависимость технологической усадки от содержания вторичного полимера: 1 – по ширине лопатки; 2 – по толщине лопатки; 3 – по длине лопатки

Figure1. Dependence technical shrinkage from content secondary polymer: 1 – on width shovel; 2 – on thickness shovel; 3 – on length shovel

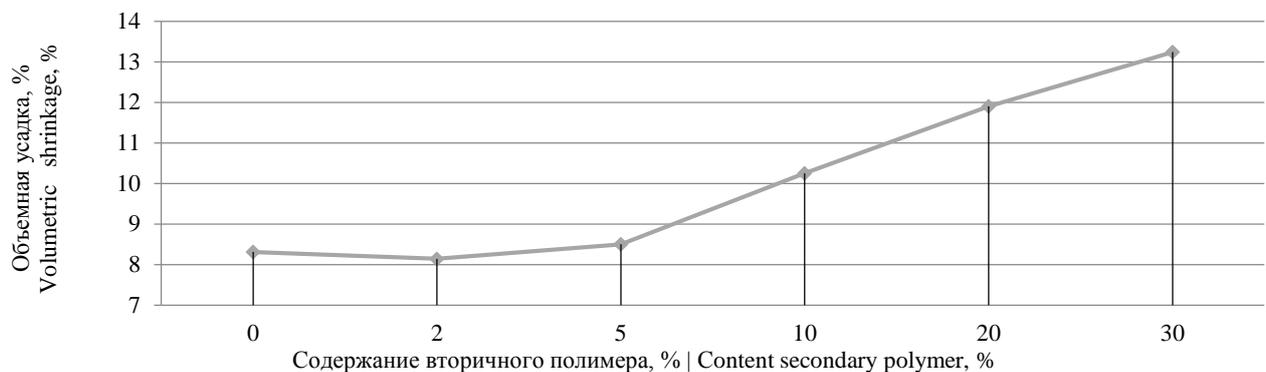


Рисунок 2. Влияние содержания вторичного полимера на объемную усадку изделий из ПММА

Figure2. The influence of the secondary polymer on volumetric shrinkage

Анализ рисунка 2 показал, что содержание вторичного полимера до 5% не влияет на объемную усадку изделий. С увеличением содержания вторичного ПММА (> 5%) объемная усадка резко возрастает – с 8,5%, при содержании вторичного полимера 5%, до 13,5%, при содержании вторичного полимера в количестве 30%. В ходе расчетов установлено – чем больше объем изделий, тем больше его объемная усадка.

Как известно усадочные явления – это следствие физических процессов, протекающих в форме при охлаждении расплава [4]. Для снижения усадки образцов использовали дополнительное оборудование – термостат для лучшего распределения расплава полимера в пресс-форме, температура термостата составляла 8 °С. Это обусловлено тем, что литье под давлением в холодную форму, помимо проблем с заполнением формы, может

быть причиной внутренних напряжений, приводящих к искажению геометрической формы, увеличению усадки изделий, а также существенному снижению прочностных и оптических свойств ПММА. [4]

На втором этапе изучено влияние содержания вторичного полимера на физико-механические и оптические показатели изделий из ПММА.

Одним из важных физико-механических свойств является плотность полимера, так как по ее можно судить о внутренних структурных превращениях, происходящих в аморфных полимерах. Измерение плотности проводилось методом гидростатического взвешивания.

В таблице 2 представлены значения плотности исследуемых образцов ПММА с различным содержанием вторичного полимера.

Таблица 2.

Влияние содержания вторичного полимера на изменение плотности ПММА

Table 2.

Influence of the content of the secondary polymer density of PMMA

Содержание вторичного полимера, % Content secondary polymer, %	Плотность образцов, кг/м ³ Density of the samples, kg/m ³
0	1182
5	1177
10	1175
15	1173
20	1171
30	1169

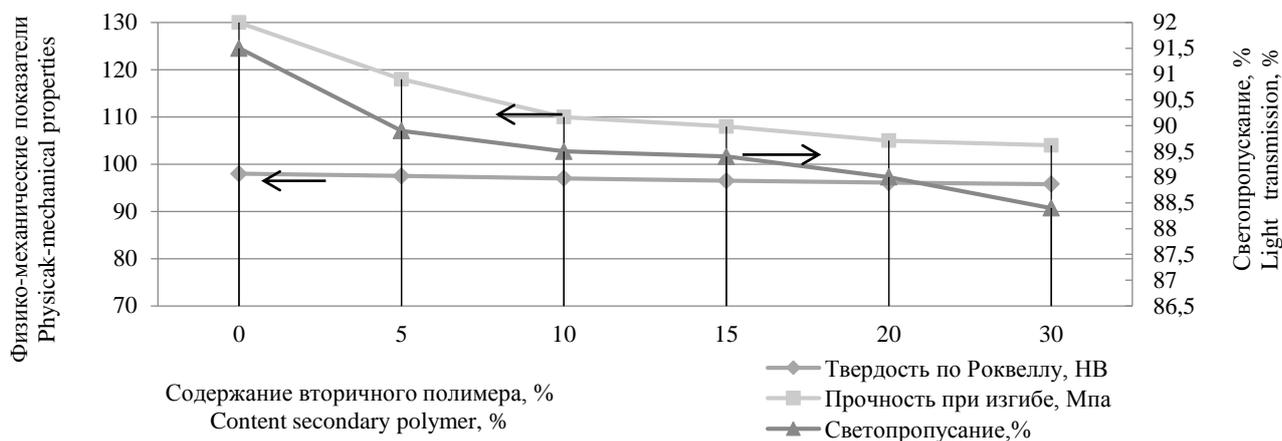


Рисунок 3. Зависимость физико-механических и оптических показателей от содержания вторичного полимера: 1 – твердость по Роквеллу, НВ; 2 – прочность при изгибе, МПа; 3 – светопропускание, %

Figure 3. Dependence physical-mechanical and optical properties from content secondary polymer: 1 – hard from Rockwell, HB; 2 – solidity to bend, MPa; 3 – light transmission, %

Из анализа рисунка 3 установлено, что при добавлении вторичного полимера физико-механические свойства ПММА ухудшаются. По нашему мнению, это связано с увеличением внутренних напряжений, так как под воздействием внешних сил в полимере происходят деформационные процессы, приводящие к изменению размеров

и формы образцов, и как следствие к появлению микротрещин на их поверхности. Эти явления связаны с изменением ориентации макромолекул и гибкостью межмолекулярных связей. Изменение ориентации приводит к ослаблению материала в направлении, перпендикулярном направлению преимущественного расположения участков цепей

Из данных таблицы 2 следует, что при повышении содержания вторичного полимера плотность образцов снижается. Известно, что изменение плотности полимеров в процессе переработки обусловлено их свойствами теплового расширения и сжатия под влиянием технологических параметров [5]. Вторичный полимер в смеси с ПММА подвергается повторной термообработке под действием температуры и давления, а также механических напряжений при пластикации полимера. Данный процесс сопровождается незначительным уменьшением упаковки макромолекул и ослаблением взаимодействий между ними в результате изменения амплитуды колебания молекул, так как в ПММА содержится вторичный полимер, который уже подвергался термическому воздействию и охлаждению, вследствие чего плотность упаковки уменьшается [6]. Подобные колебания молекул приводят к увеличению свободного (или термического) объема ПММА в результате деформационных изменений плотности упаковки макромолекулы, вследствие чего происходят изменения физико-механических характеристик ПММА, содержащего вторичный полимер (до 30%). Можно отметить, что целостность полимерного материала поддерживают межмолекулярные силы, так называемые Ван-дер-Ваальса.

Результаты эксперимента обобщены в виде графических зависимостей на рисунке 3.

и к образованию внутренних напряжений, что неблагоприятно сказывается на поведении изделий при эксплуатации. Неравномерно распределенные внутренние напряжения могут приводить к растрескиванию, образованию микротрещин, ухудшению оптических свойств, короблению изделий и снижению размерной стабильности изделий. Образование микротрещин на поверхности ПММА – наиболее наглядный процесс изменения ориентации макромолекул, так как полимер обладает хорошей прозрачностью, что позволяет наблюдать за образованием микротрещин на образцах с увеличением вторичного полимера.

Светопропускание является одним из важных свойств ПММА [10]. Известно, что полимеры содержащие функциональную группу $C=O$, как ПММА, обладают высокой прозрачностью в УФ-области спектра, и в ближней УФ-области полиметилметакрилатное органическое стекло более прозрачно, чем оптические силикатные стекла [1].

В ходе спектрального анализа с помощью прибора СФ-56 в диапазоне длин волн $\lambda = 190-1090$ нм, установлено, что введение вторичного полимера до 30% не оказывает влияния на молекулярную структуру цепей полимера (рисунок 4). Однако с увеличением содержания вторичного полимера светопропускание образцов из ПММА снизилось до 88%. Известно, что увеличение концентрации ПММА в растворе также приводит к снижению светопропускной способности [7].

Анализ химического состава ПММА методом ИК-спектроскопии осуществлен с использованием образцов в виде пленок, полученных из растворенных в хлороформе гранул ПММА марки Асугтех 205 СМ и вторичного полимера. Анализ спектров пленок ПММА (рисунок 5) показал, что в диапазоне колебаний функциональных групп, атомов связей 4500–700 cm^{-1} практически не наблюдалось различий для ПММА и вторичного полимера.

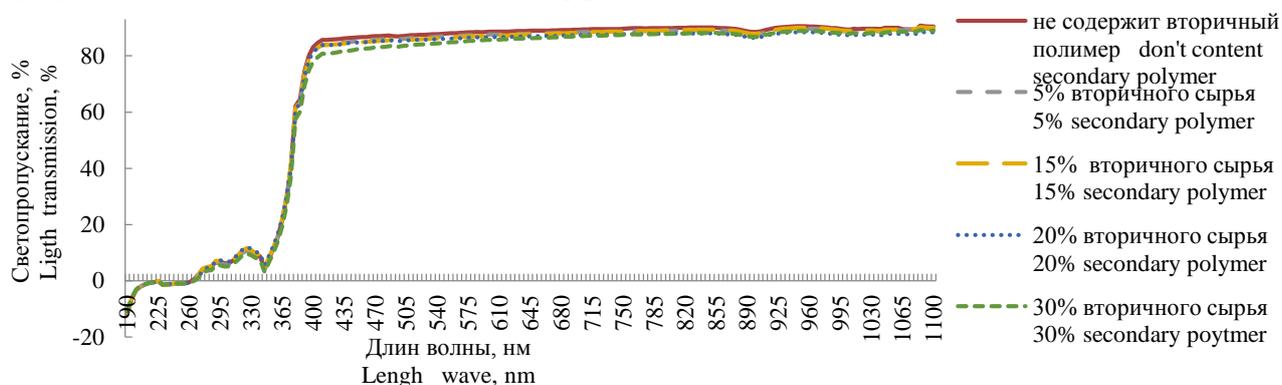


Рисунок 4. Влияние вторичного полимера на молекулярную структуру ПММА

Figure 4. The influence of the secondary polymer on molecular structure PMMA

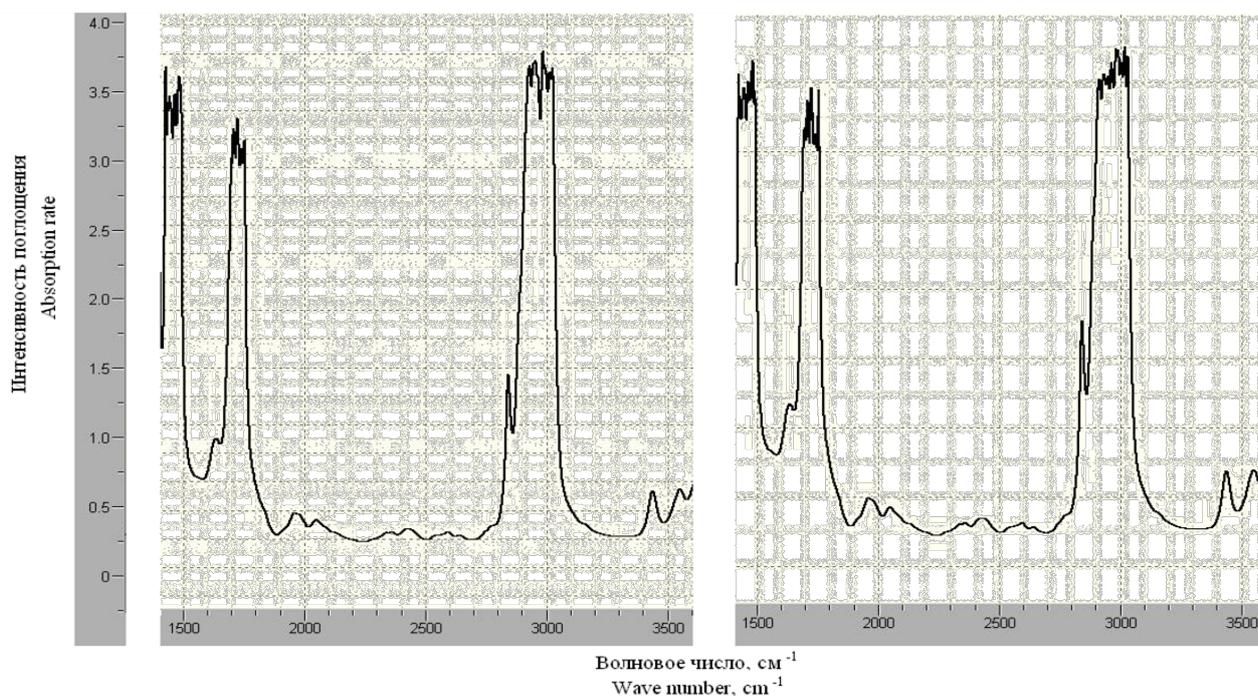


Рисунок 5. ИК-спектры ПММА: (а) – Асугтех 205 СМ; (б) – вторичный ПММА

Figure 5. IR spectra of PMMA: (a) – Acrytex 205 CM; (b) – secondary PMMA

Из анализа полученных ИК-спектров следует, что структурный состав ПММА не изменяется после нагревания полимера в шнеке литьевой машины и его последующего охлаждения (отверждения) в пресс-форме. Следовательно, ПММА с содержанием вторичного полимера имеет те же самые характеристики, что и ПММА, не содержащий вторичный полимер.

Заключение

Результаты исследований показали, что введение вторичного полимера в конструкционный ПММА приводит к незначительному ухудшению физико-механических свойств, что связано с повторной термо-механической обработкой полимера при получении образцов. Следует отметить, что на линейную усадку образцов введение вторичного полимера практически не влияет. В тоже время средняя объемная усадка возрастает с увеличением содержания вторичного полимера. Полученные результаты

ЛИТЕРАТУРА

1 Mecaline I. V., Aizatulin M. K., Sentjurin E. G., Bogatov V. A. Kinetics of the changes in the performance of the glazing elements of the new modified organic glasses of the partially cross-linked structure in the process of exposure in conditions of moderately warm climate // *International Polymer Science and Technology*. 2015. P. 14-16

2 Яковлев Н.О. Релаксационное поведение органического стекла на основе полиметилметакрилата // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. С. 57-60.

3 Matseevich T. A., Kovriga O. V., Mateevich V. A., Askadsky A. A. Analysis of influence of chemical composition and concentration of components of the mixture the polymer-solvent in the limit of forced elasticity and viscosity // *International Polymer Science and Technology*. 2016. P. 30 – 34

4 Карманова О.В., Щербаклова М.С., Борисовская Е.М., Прокопчук Н.Р. Влияние условий обработки полиметилметакрилата на оптические и физико-механические свойства изделий // Труды БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2013. № 4 (160). С. 134–137

5 Zuev B.M., Zuev M.B., Ulitin N.V., Deberdeev T.R. Determination of optical and mechanical properties of polymers // *International Polymer Science and Technology*. 2012. P. 7-9

6 Ломовской В.А. Релаксационные явления в полиметилметакрилате // Тонкие химические технологии. 2015. С. 5-49

7 Hussein Neama Najeeb, Asim Alaa Balakit, Ghaleb Abdul Wahab, Ahmed Kadem Kodeary. Study of the optical properties poly (methyl methacrylate) (PMMA) doped with a new diarylethen compound // *Academic Research International*. 2014. V. 5. № 1

8 Моцинов П.В., Власов С.В. Влияние молекулярной массы на ориентацию и свойства листов из ПММА // *Материалы остекления в авиационной промышленности. Сборник докладов круглого стола. ФГУП «ВИАМ»*. 2016. С. 8

следует учесть при использовании вторичного ПММА в производстве получения изделий больших размеров и сложных сечений. ПММА является перспективным материалом для изготовления тонкостенных изделий сложной конфигурации. Для конструкционных деталей, к которым предъявляются повышенные требования к точности размеров и геометрии, возможно использование вторичного полимера в количестве до 30%.

Светопропускание образцов при добавлении вторичного полимера в количестве до 30% снижается незначительно менее 5%. Это позволяет вернуть в новый технологический цикл вторичный полимер, образовавшийся при изготовлении деталей из ПММА, что приведет к сокращению отходов и улучшению экологической обстановки, а также не повлияет на структурные и межмолекулярные изменения в полимере ПММА.

9 Имашева Н.М. Спектральные методы определения строения органических соединений: учебное пособие. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2013. 84 с.

10 Yakovlev N. O. Assessment area boundary the relaxation behavior of organic glasses based on polymethylmethacrylate // *International Polymer Science and Technology*. 2015. P. 36-39.

REFERENCES

1 Mecaline I. V., Aizatulin M. K., Sentjurin E. G., Bogatov V. A. Kinetics of the changes in the performance of the glazing elements of the new modified organic glasses of the partially cross-linked structure in the process of exposure in conditions of moderately warm climate [*International Polymer Science and Technology*] 2015. pp. 14-16

2 Yakovlev N. O. Relaxation behavior of organic glasses based on polymethylmethacrylate. *Zavodskaya laboratoriya*. [Factory laboratory. Diagnostics of materials] 2015. pp. 57-60. (in Russian)

3 Matseevich T.A., Kovriga O.V., Mateevich V.A., Askadsky A. A. Analysis of influence of chemical composition and concentration of components of the mixture the polymer-solvent in the limit of forced elasticity and viscosity [*International Polymer Science and Technology*] 2016. pp. 30 – 34.

4 Karmanova O.V., Shcherbakova M.S., Borisovskaya E.M., Prokopchuk N.P. Influence of processing conditions of polymethylmethacrylate on the optical and physico-mechanical properties of products. *Trydi BGTU, naychniizhurnal god, Himiya, tehnologiyaorganicheskikhvechestv I biotehnologiya* [*Proceedings of BSTU. Chemistry, technology of organic substances and biotechnology*] 2013. № 4 (160). P. 134–137 (in Russian)

5 Zuev B. M., Zuev M. B., Ulitin N. V., Deberdeev T. R. Determination of optical and mechanical properties of polymers [*International Polymer Science and Technology*] 2012. pp. 7-9.

6 Lomovsky, V. A. Relaxation phenomena in PMMA. *Tonkie khimicheskie tekhnologii* [Fine chemical technology] 2015. pp. 5-49 (in Russian)

7 Hussein Neama Najeeb, Asim Alaa Balakit, Ghaleb Abdul Wahab, Ahmed Kadem Kodeary. Study of the optical properties poly (methyl methacrylate) (PMMA) doped with a new diarylethen compound [Academic Research International] 2014. vol. 5. no. 1.

8 Motsinov P. V., Vlasov S. V. Influence of molecular weight on the orientation and properties of the sheets of PMMA. *Materialy ostekleniya v aviatsionnoi promyshlennosti* [Glazing materials in the aviation

industry. Collection of reports of the round table. FSUE "VIAM"] 2016. pp. 8 (in Russian)

9 Imasheva N. M. *Spektral'nye metody opredele-niya stroeniya organicheskikh soedinenii* [Spectral methods of determination of structure of organic compounds] Astrakhan, Publishing house "Astrakhan University", 2013. 84 p. (in Russian)

10 Yakovlev N. O. Assessment area boundary the relaxation behavior of organic glasses based on polymethylmethacrylate [International Polymer Science and Technology] 2015. pp. 36-39.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Екатерина М. Борисовская аспирант, кафедра химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, borisovskaya_e@mail.ru

Ольга В. Карманова д. т. н., профессор, кафедра химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, karolga@mail.ru

Маргарита С. Щербакова к. т. н., доцент, кафедра химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, schmstpp@yandex.ru

Виктор В. Калмыков к. т. н., доцент, кафедра химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaftpp14@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Екатерина М. Борисовская обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провела эксперимент, выполнила расчёты

Ольга В. Карманова предложила методику проведения эксперимента и организовала производственные испытания

Маргарита С. Щербакова консультация в ходе исследования

Виктор В. Калмыков консультация в ходе исследования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 12.01.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 17.02.2017

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ekaterina M. Borisovskaya graduate student, chemistry and chemical technology of organic compounds and polymer processing department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, borisovskaya_e@mail.ru

Olga V. Karmanova doctor of technical sciences, professor, chemistry and chemical technology of organic compounds and polymer processing department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, karolga@mail.ru

Margarita S. Shcherbakova candidate of technical sciences, associate professor, chemistry and chemical technology of organic compounds and polymer processing department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, schmstpp@yandex.ru

Viktor V. Kalmikov candidate of technical sciences, associate professor, chemistry and chemical technology of organic compounds and polymer processing department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaftpp14@mail.ru

CONTRIBUTION

Ekaterina M. Borisovskaya review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Olga V. Karmanova proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Margarita S. Shcherbakova consultation during the study

Viktor V. Kalmikov consultation during the study

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 1.12.2017

ACCEPTED 2.17.2017