

## Светорассеивающий композиционный материал на основе полистирола, полиэтилена и стеклянных полых микросфер

### Light-diffusing composite material based on polystyrene, polyethylene and hollow glass microspheres

*И.З. ФАЙЗУЛЛИН, К.Е. ГОЛУБЧИКОВА, С.И. ВОЛЬФСОН*

*I.Z. FAYZULLIN, K.E. GOLUBCHIKOVA, S.I. VOLFSO*

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Kazan National University of Research and Technology

ilnur-fz@mail.ru

Разработаны светорассеивающие композиции на основе полистирола, полиэтилена и стеклянных полых микросфер. Установлен состав композиции с оптимальным соотношением коэффициентов светопропускания и светорассеивания.

**Ключевые слова:** светорассеивание, светопропускание, светотехника, полистирол, микросферы, стеклянные полые микросферы

Light scattering composites based on polystyrene, polyethylene and glass hollow microspheres have been developed. Composites with the optimal ratio of light transmission and light scattering coefficients has been produced.

**Keywords:** light scattering, light transmission, lighting engineering, polystyrene, microspheres, glass hollow microspheres

DOI: 10.35164/0554-2901-2019-7-8-62-66

Появление на мировом рынке высокоэффективных осветительных элементов, в частности, светодиодов, способствует активному развитию светотехнической отрасли. Все более востребованными становятся высокотехнологичные компоненты световых приборов, способные удовлетворить запросы потребителей.

Светодиодные элементы отличаются ослепляющей яркостью, что налагает некоторые ограничения на их использование. Обеспечить комфортное восприятие светодиодного освещения возможно благодаря установке светорассеивающих панелей. Поток лучистой энергии, проходя через материальную среду, ослабляется за счет физических явлений, таких как поглощение и рассеивание. Поглощение света, т.е. уменьшение интенсивности оптического излучения, проходящего через среду, заполненную веществом – крайне невыгодное явление для светотехнических материалов, т.к. способствует снижению КПД светового элемента на выходе после рассеивателя. Рассеивание света происходит в оптически неоднородной среде, показатель преломления которой нерегулярно изменяется от точки к точке вследствие флуктуаций плотности среды. Рассеивание света выражается изменением характеристик потока оптического излучения, таких как пространственное распределение интенсивности при взаимодействии его с веществом [1]. Задача рассеивателя перераспределить свет источника таким образом, чтобы пространственное распределение было максимально возможным, при минимуме световых потерь.

В светотехнике, как и во многих других отраслях промышленности, силикатные материалы заменяются полимерными. Последние имеют явные преимущества по физико-химическим, механическим, технологическим и экономическим показателям.

В светотехнике широко используются такие полимерные материалы как полиметилметакрилат, поликарбонат и полистирол. Для придания материалу светорассеивающих свойств прибегают к нанесению тиснений на поверхность листа, таких как микропризма, «колотый лёд», пинспот, которые способствуют преломлению и рассеиванию света при прохождении через тисненый лист. Для придания светорассеивающих свойств листам с гладкой поверхностью прибегают к введению в состав светорассеивающих добавок, диффузоров. В этом случае рассеивание луча света происходит за счет его преломления при столкновении с частицами диффузора в массе материала. Кроме требований к оптическим свойствам, рассеивающие материалы при эксплуатации могут испытывать механические нагрузки, в связи с чем физико-механические свойства также учитываются при выборе материала для рассеивателей.

Широко используемые для придания светорассеивающих свойств наполнители в полимерных композиционных материалах представляют собой минеральные вещества, такие как диоксид титана и сульфат бария, фосфат титана, гидрофосфат свинца, оксид цинка, сульфид цинка. Группа минеральных наполнителей имеет преимущества по стоимости, но их недостаток – в существенном снижении коэффициента светопропускания материала, что сказывается на эффективности светового элемента после прохождения светового потока через среду. Наиболее эффективными светорассеивающими добавками на сегодняшний день показывают себя полимерные сферические наполнители на основе сшитых акрилатов и силиконов [2–4]. В зависимости от области применения материала и природы матрицы производители предлагают использовать тот или иной вид наполнителя. Для светотехнического полистирола возможно использование наполнителя в виде полимерных микросфер на основе кремнийорганических соединений, в частности, полиметилсилсесквиоксана [5, 6]. Производители заявляют о преимуществах продукта, таких как максимальное рассеивание светового потока с сохранением высокого уровня светопропускания, высокая энергоёмкость, минимальное потребление энергии, снижение затрат [7]. Развивающаяся отрасль светотехнических материалов постоянно находится в поиске инновационных добавок и аналогов существующих продуктов, позволяющих получить высокотехнологичные материалы, удовлетворяющие спрос рынка. Разработка высокоэффективных рассеивающих материалов для осветительных элементов является актуальной задачей в области светотехники.

Таким образом, целью данной работы явилась разработка композиционного светорассеивающего материала с оптимальным соотношением показателей светорассеивания и светопропускания.

В качестве основного полимера был выбран полистирол (ПС). Применение полистирола для изготовления светотехнического оборудования базируется на его высоком коэффициенте светопропускания (до 90%), высоком коэффициенте преломления (1,59), диэлектрических свойствах и невысокой стоимости относительно других оптических полимеров [8]. В работе использовали полистирол общего назначения марки 585 производства ПАО «Нижнекамскнефтехим».

Стеклянные полые микросферы (далее – микросферы) – многофункциональная добавка для модификации полимеров [9–11], представляющая собой сыпучий порошок белого цвета. Микросферы – высокотехнологичный наполнитель, изготавливающийся

ся из стабильного натрий-известкового боросиликатного стекла, влагонепроницаемый, не горючий, не пористый, обладает низкой щелочностью, совместим со многими полимерами. Применяется как добавка для снижения конечного веса изделий и расхода связующих веществ за счет чрезвычайно низкой плотности. Производители предлагают различные марки в зависимости от назначения и условий переработки [12–13]. Важные функции микросфер в композициях связаны с их сферической формой. Микросферы облегчают переработку композиций, придают размерную стабильность материалу за счет равномерного распределения напряжений вокруг сферических частиц, имеют хорошую упаковку фракций, что способствует высокой степени наполнения, отсутствию ориентационных эффектов и гладкой поверхности изделий [14]. Влияние на механические свойства сильно зависит от степени наполнения и толщины стенок шариков, но некоторое увеличение модуля обычно сопровождается снижением разрывной и ударной прочности [15].

Работа предполагала экструзионную переработку микросфер. В связи с повышенной текучестью микросфер, экструзионная переработка предусматривает высокоточные дозирующие системы для подачи строго заданного количества микросфер. Кроме того, в процессе переработки микросферы подвержены разрушению за счет высоких сдвиговых нагрузок. Не рекомендуется использовать микросферы в процессах с большим усилием сдвига в точке контакта.

Исходя из целей работы и условий переработки была выбрана марка микросфер с высоким отношением прочности к весу. Для работы были выбраны микросферы производства компании 3М, марки Glass Bubbles iM16K. Микросферы выбранной марки обладают плотностью 0,46 г/см<sup>3</sup> и изотактической прочностью на сжатие 16 psi. Средний размер частиц 20 мкм. Данная марка имеет повышенную устойчивость при жестких условиях переработки, таких как экструзия и литье под давлением.

Для получения материалов с улучшенными свойствами широко используются смеси полимеров. Благодаря смешению полимеров в определенных соотношениях удается получить разнообразные свойства материала, в частности, светотехнические.

В качестве компонента, способствующего дополнительному повышению светорассеивания и мутности композиции, использовали полиэтилен высокого давления (ПВД) в смеси с полистиролом. ПВД – кристаллизующийся полимер, степень кристалличности которого при комнатной температуре достигает 50–90% в зависимости от способа получения. Характеризуется высокой прочностью, стойкостью к агрессивным средам, высокими диэлектрическими свойствами [16].

Причиной недостаточной прозрачности большинства кристаллических полимеров является рассеивание света надмолекулярными образованиями. Рассеивание света в ПЭ связано с его оптической неоднородностью, обусловленной наличием аморфной и кристаллической фаз, различающихся по плотности. При кристаллизации из расплавов полимеров могут возникать такие анизотропные структуры, как сферолиты. Размеры кристаллитов в ПЭ высокого давления лежат в пределах 5–50 нм, а размеры сферолитов превышают 100 нм. Основной вклад в светорассеивание вносит рассеивание на сферолитах, размеры которых одного порядка с длиной волны видимого света. Интенсивность рассеянного света снижается с уменьшением степени кристалличности полимера.

Предполагается, что введение микросфер и полиэтилена совместно или индивидуально в полистирол может способствовать получению необходимых оптических свойств композита, а именно оптимального соотношения коэффициентов светопропускания и светорассеивания.

Компаунды на основе полистирола с введением полиэтилена и микросфер в различных комбинациях получали на двухшнековом экструдере фирмы OMC S.p.A., Италия. Отношение длины шнека экструдера к его диаметру  $L/D = 44$ , производительность при установленном режиме 100 кг/час, температура по зонам в диапазоне 100–250°C. Влияние микросфер и/или полиэтилена высокого давления в составе композиций на основе полистирола исследовалось в диапазоне дозировок, указанных в таблице 1, всего было наработано 8 компаундов различного состава.

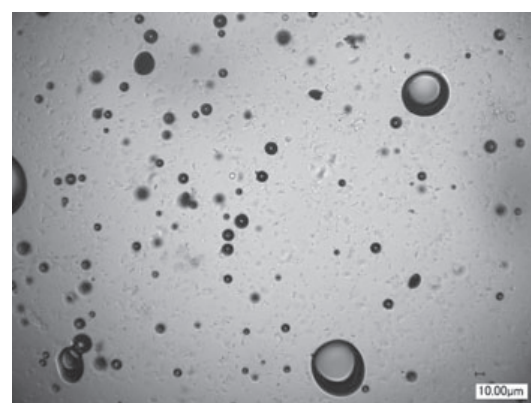
Для проведения дальнейших исследований из гранулированных компаундов методом литья под давлением получали образцы на термопластавтомате.

Таблица 1. Состав исследуемых композиций.

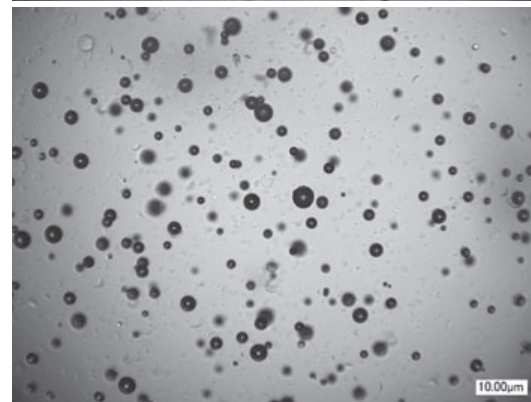
| № образца | ПС, % | Микросферы, % | ПВД, % |
|-----------|-------|---------------|--------|
| 1         | 99,8  | 0,2           | –      |
| 2         | 99,6  | 0,4           | –      |
| 3         | 99,5  | 0,5           | –      |
| 4         | 99    | 1             | –      |
| 5         | 90    | –             | 10     |
| 6         | 95    | –             | 5      |
| 7         | 94,5  | 0,5           | 5      |
| 8         | 94,2  | 0,8           | 5      |



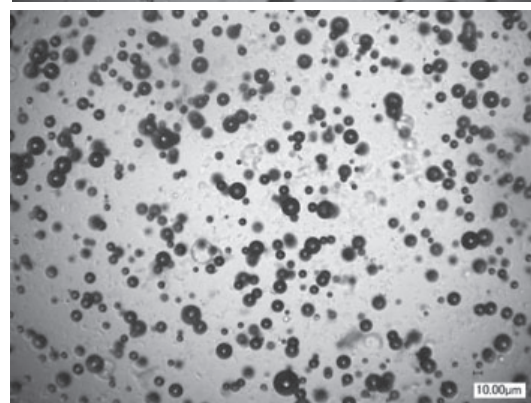
а



б



в



г

Рис. 1. Микрофотографии тонкого среза композиций на основе полистирола с содержанием микросфер а – 0,2%, б – 0,4%, в – 0,5%, г – 1%. Микроскоп KEYENCE VHX-1000, увеличение 500×.



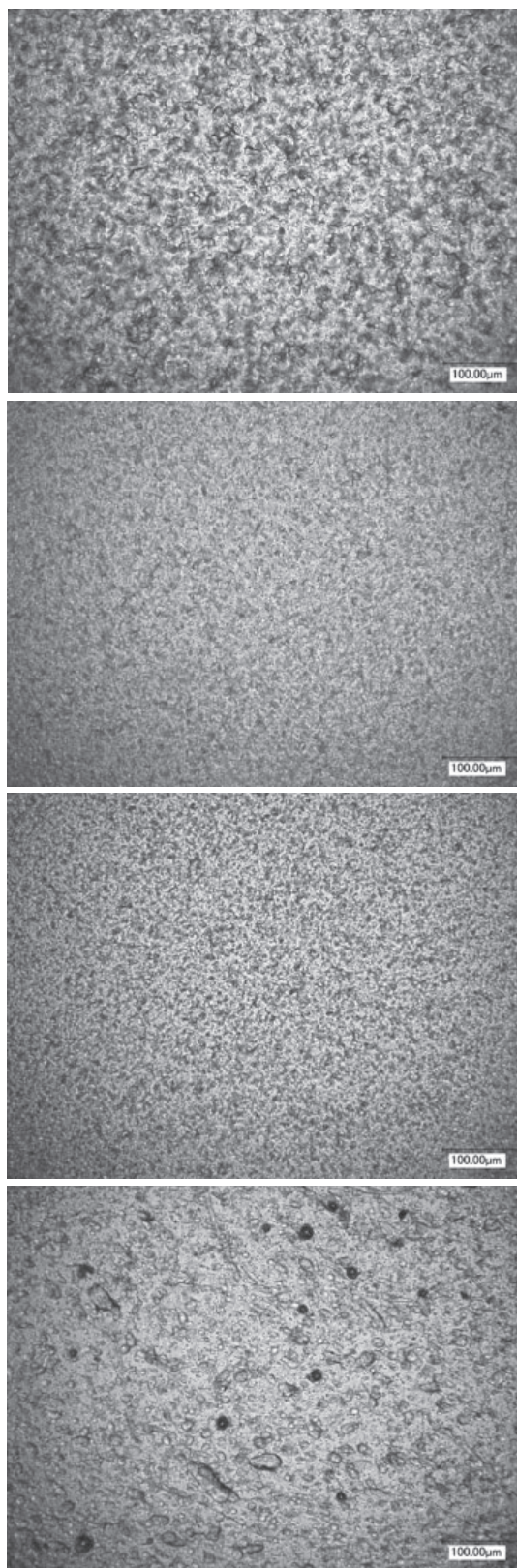


Рис. 2. Микрофотографии тонкого среза композиций на основе полистирола а – 95:5 (ПС:ПВД), б – 90:10 (ПС:ПВД); в – 94,5:5:0,5 (ПС:ПВД:Микросферы), г – 94,2:5:0,8 (ПС:ПВД:Микросферы). Микроскоп KEYENCE VHX-1000, увеличение 50 $\times$ .

Морфологию композиций и целостность микросфер после переработки исследовали на цифровом микроскопе KEYENCE VHX-1000 при увеличении 500 $\times$  в проникающем свете тонкого среза композиции. Плотность образцов измеряли согласно ГОСТ 15139-69 методом гидростатического взвешивания. Метод сводится к последовательному взвешиванию тела на пружинном динамометре сначала в воздушной среде, затем в жидкости, с известной собственной плотностью. В качестве жидкости использовали дистиллированную воду [17]. Модуль упругости определяли по ГОСТ 9550-81 на разрывной машине ИР 5047-50-11. Светопропускание измеряли на спектрофотометре SPECORD 40 (Analytik Jena,

Германия) согласно ГОСТ 26302-93, метод А. Значение коэффициента светопропускания (КСП) замеряли при длине волны, равной 698 нм. Коэффициент светорассеивания определяли с помощью однолучевого шарового фотометра согласно ASTM D 1003-00. В качестве источника света применяли одночастотный непрерывный зеленый лазер на длине волны 532 нм. Для измерения мощности светового потока использовали панель управления для измерителей мощности и энергии Throlabs PM320E и фотодиодный датчик Throlabs S302S.

Тонкостенные стеклянные полые микросферы чувствительны к сдвиговым деформациям. Фрагменты деструкции микросфер могут повредить оборудование, в частности, шнеки и цилиндр экструдера, оставить микроцарапины на поверхности и вызвать преждевременный износ [10]. Принимая во внимание жесткие условия переработки материала, была вероятность потери целостности микросфер, в связи с чем были проведены исследования на цифровом микроскопе. Микрофотографии композиций на основе полистирола с содержанием микросфер представлены на рисунке 1.

Микроскопии также подвергали образцы на основе полистирола, полиэтилена и микросфер. Кроме устойчивости микросфер также наблюдали особенности морфологии полученных композиций. Микрофотографии композиций на основе полистирола с содержанием полиэтилена и микросфер представлены на рисунке 2.

Полученные данные по микроскопии показали отсутствие следов деструкции, осколков и фрагментов микросфер в композиции. На рис. 1–2 отчетливо просматриваются целые полые микросферы, размер частиц наполнителя в пределах 15–25 мкм. Микросферы выдержали условия переработки, что подтверждает возможность переработки микросфер исследуемой марки экструзией и литьем под давлением. Микросферы равномерно распределены в объеме полимера. Как видно из представленных микрофотографий на рис. 2, при введении ПВД в состав исследуемых композиций наблюдается иная морфология композиции по сравнению с микрофотографиями на рис. 1. На снимках можно увидеть обособленные образования, равномерно распределенные в объеме, которые отсутствуют на рисунке 1. Исходя из этого, можно сделать предположение, что включения на рис. 2 образованы за счет образования сферолитов полиэтилена в объеме полистирола. С увеличением содержания ПВД в составе композиций скопление образований становится плотнее. Полистирол и полиэтилен являются неполярными полимерами. В процессе образования полимерной смеси полистирол-ПВД была получена гетерогенная система. В областях малых добавок одного из компонентов он может рассматриваться как дисперсная фаза. Специфической особенностью смесей полимеров как гетерогенных коллоидных систем является существование межфазного слоя между компонентами [18].

На сегодняшний день все большую актуальность приобретают материалы с пониженной плотностью, так как это может позволить снизить сырьевые и топливные затраты. Полые микросферы обладают существенно более низкой плотностью в сравнении с полистиролом и полиэтиленом. Плотность чистого полистирола равна 1,05 г/см<sup>3</sup>, ПВД – 0,92 г/см<sup>3</sup>, микросфер – 0,46 г/см<sup>3</sup>. В связи с чем предполагалось, что их введение будет способствовать снижению плотности материала. Сферическая форма наполнителя предполагает меньшее количество связующего для смачивания его поверхности по сравнению с другим формовым наполнителем, способствует снижению расхода связующего [15]. Влияние введения микросфер в диапазоне дозировок 0,2–1% мас. в полистирол на плотность композиции показано на рисунке 3.

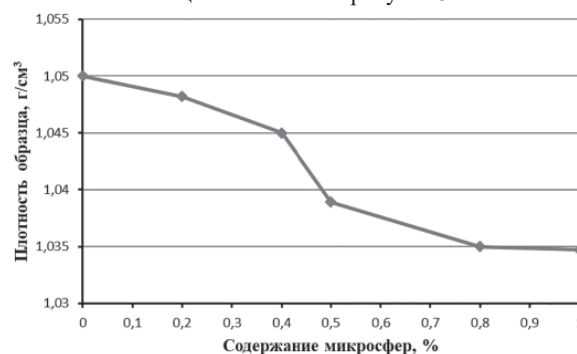


Рис. 3. Зависимость плотности образца от содержания микросфер.

Микросферы в составе композиции в исследуемом диапазоне дозровок позволили незначительно снизить ее плотность в сравнении с плотностью чистого полистирола (рис. 3). Снижение плотности композиции подтверждает устойчивость микросфер после переработки. Введение ПВД с состав полистирола в количестве 5–10% мас. позволило снизить плотность композиции в сравнении с чистым полистиролом на 1,3% и 2% соответственно. В диапазоне исследуемых дозровок наличие микросфер в составе композиции из полистирола и полиэтилена сказалось на плотности незначительно. Для достижения более существенных результатов по снижению плотности микросферы следует вводить в большем количестве.

Материалы, используемые в светотехнике, изначально выпускаются в виде монолитных листов, которые в дальнейшем могут подвергаться формованию для придания заданной формы конечного изделия. Рассеивающие элементы используют в различных конструкциях осветительных приборов, рекламных коробах, информационных табло и т.д. В процессе эксплуатации они могут подвергаться различного рода деформациям и механическим воздействиям, в связи с чем физико-механические характеристики являются немаловажным свойством при выборе материала.

Важной эксплуатационной характеристикой является модуль упругости. Высокий модуль упругости материала позволяет воспринимать большую нагрузку и обеспечивает повышенную устойчивость к повреждениям в процессе эксплуатации. Модуль упругости при изгибе композиций на основе полистирола с различным количеством микросфер составил в среднем 5 ГПа и незначительно менялся в зависимости от количества микросфер исследуемого диапазона дозровок. Значение модуля упругости при изгибе композиций на основе полистирола и полиэтилена составило 3,7 и 4,4 ГПа для 10% мас. и 5% мас. соответственно. Наличие микросфер в составе композиций на основе полистирола и полиэтилена 5% мас. не повлияло на модуль упругости, его значение составило 4,4 ГПа. Наличие полиэтилена в составе композиции снижало модуль упругости образцов пропорционально его количеству в составе.

Наиболее значимой характеристикой для светорассеивающих материалов является остаточный КПД светового элемента после прохождения света через рассеиватель. Таким образом определяется энергоэффективность материала, которая представляет собой отношение светового потока излучающего элемента к световому потоку, прошедшему через лист. Для практических целей предпочтительно значение КПД не менее 30%. В случае превышения этого порога применение данного вида рассеивающего материала становится энергоэкономически нецелесообразно вследствие значительного снижения КПД светильника. Для оценки КПД светильника определяли коэффициент светопропускания материала (КСП). Результаты спектрофотометрии, а именно графики зависимости КСП от состава композиций, представлены на рисунках 4–6.

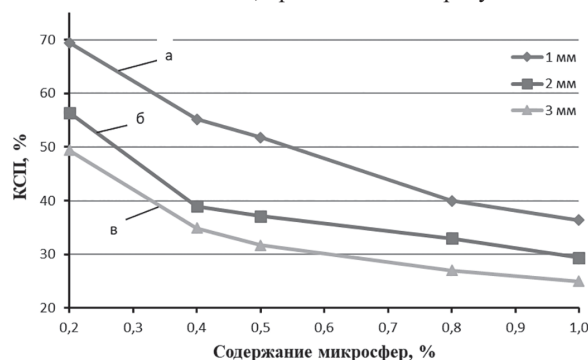


Рис. 4. Зависимость коэффициента светопропускания композиций на основе полистирола от содержания микросфер. Толщина образца: а – 1 мм, б – 2 мм, в – 3 мм.

Влияние ввода микросфер в различных количествах в состав композиции на КСП материала показано на рисунке 4.

КСП зависел от толщины образца и содержания микросфер в полистироле. С увеличением толщины образца и количества микросфер в составе материала КСП снижался.

Введение 5% мас. полиэтилена в полистирол привело к значительному снижению КСП. При дальнейшем увеличении количества полиэтилена в композиции КСП менялся незначительно в пределах одной толщины образца.

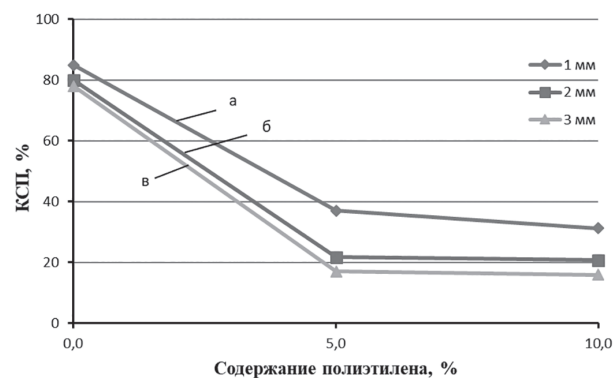


Рис. 5. Зависимость коэффициента светопропускания композиций на основе полистирола и полиэтилена от количества полиэтилена в составе. Толщина образца: а – 1 мм, б – 2 мм, в – 3 мм.

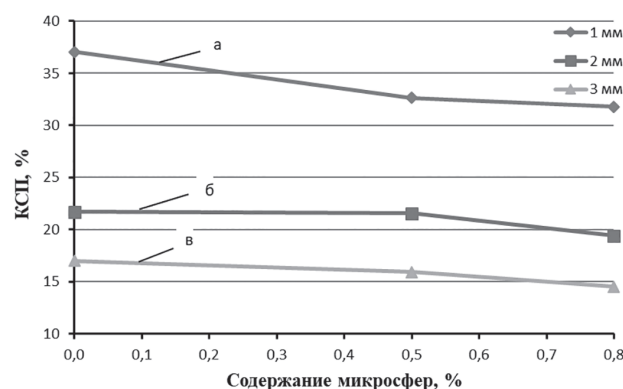


Рис. 6. Зависимость коэффициента светопропускания композиций на основе полистирола, полиэтилена 5% мас. и микросфер от количества микросфер в составе. Толщина: а – 1 мм, б – 2 мм, в – 3 мм.

Содержание микросфер в композициях на основе полистирола и 5% мас. полиэтилена влияло на КСП материала незначительно (рис. 6). В данном случае наблюдалась существенная зависимость КСП только от толщины исследуемого образца.

Одной из главных задач для светотехнических материалов является равномерное рассеивание чрезвычайно яркого точечного источника света для его комфортного восприятия. Распределение световой энергии после прохождения через материал численно характеризуется коэффициентом светорассеивания.

Графики зависимости коэффициента светорассеивания образцов толщиной 1, 2 и 3 мм от состава образцов при длине волны 532 нм представлены на рисунках 7–9.

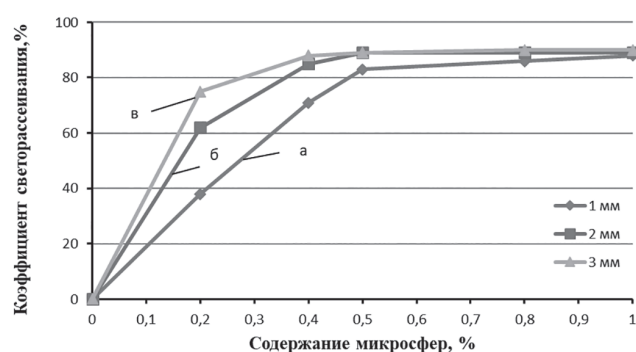


Рис. 7. Зависимость коэффициента светорассеивания композиций на основе полистирола от содержания микросфер. Толщина образца: а – 1 мм, б – 2 мм, в – 3 мм.

Из рис. 7 следует, что коэффициент светорассеивания резко возрастал при введении в состав композиции микросфер. Для толщин 2 и 3 мм при достижении концентрации 0,4% коэффициент светорассеивания менялся незначительно с дальнейшим увеличением содержания микросфер в составе композиции. Учитывая цель работы, результаты испытаний на светопропускание и светорассеивание образцов были проанализированы таким образом, чтобы высокому коэффициенту светорассеивания, близкому к максимальному из выборки, соответствовал удовлетворительный коэффициент светопропускания, не менее 30% на всех испытываемых толщинах. Среди композиций на основе полистирола и микросфер таким



условиям соответствовал состав с введением 0,4% микросфер. В данном случае коэффициент светорассеивания образцов составил 71%, 85% и 88% на толщине 1, 2 и 3 мм. При этом КСП составил 55%, 39%, и 35% для толщин 1, 2 и 3 мм соответственно.

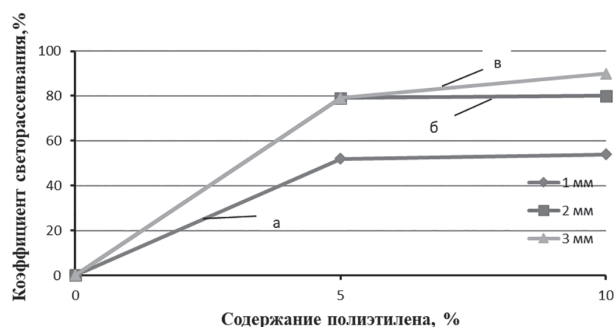


Рис. 8. Зависимость коэффициента светорассеивания композиций на основе полистирола и полиэтилена от количества полиэтилена в составе. Толщина образца: а – 1 мм, б – 2 мм, в – 3 мм.

Введение полиэтилена в полистирол способствовало повышению коэффициента светорассеивания. При увеличении содержания полиэтилена в композиции от 5 до 10% мас. и увеличении толщины образца от 2 до 3 мм значимых изменений коэффициента светорассеивания не наблюдалось (рис. 8). В связи с этим рассматривали показатели при наименьшем проценте ввода полиэтилена, а именно 5%. Коэффициент светорассеивания образцов составил 52% на толщине 1 мм и 79% на толщине 2 и 3 мм. При этом КСП составил 37%, 22%, и 17% для толщин 1, 2 и 3 мм соответственно. Как указывалось выше, для практического применения в светотехнике приемлем КСП не менее 30% вне зависимости от толщины образца. Такому условию композиция на основе полистирола и полиэтилена 5% мас. соответствовала только на толщине образца 1 мм.

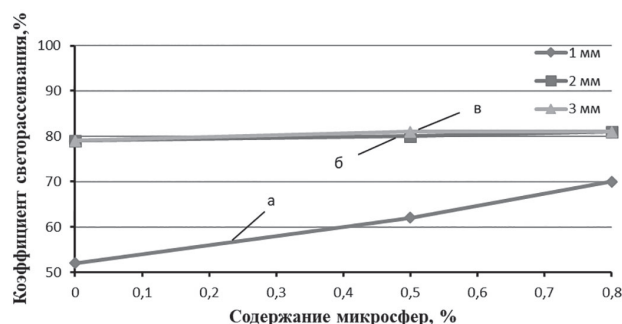


Рис. 9. Зависимость коэффициента светорассеивания композиций на основе полистирола, полиэтилена 5% мас. и микросфер от количества микросфер в составе. Толщина образца: а – 1 мм, б – 2 мм, в – 3 мм.

Введение микросфер в композицию на основе полистирола и 5% мас. полиэтилена имело незначительное влияние на светорассеивание образцов толщиной 1 мм, для образцов толщиной 2 и 3 мм коэффициент светорассеивания остался практически неизменным. Из полученных данных следует, что одновременное введение полиэтилена и микросфер в полистирол не представляет практического интереса, так как наличие микросфер в данном случае не влияет на коэффициенты светопропускания и светорассеивания.

Таким образом, композиция на основе полистирола и микросфер в количестве 0,4% мас. удовлетворяет предъявляемым требованиям для светотехнических изделий и обладает оптимальным соотношением коэффициентов светорассеивания и светопропускания. По вышеизложенной рецептуре возможно получение композиции для использования в светотехнической области, которая может обеспечить удовлетворительное рассеивание света без значительных потерь КПД светового элемента.

## Литература

1. Серова В.Н. Полимерные оптические материалы. – СПб.: Научные основы и технологии, 2011. – 384 стр.
2. Пат. EP0634445A1, МПК G02B5/0242, C08K3/013, C08L51/003, C08L69/00, G02B5/0268, G02B5/0278 Light diffuser composition / Juergen Eiffler, Craig Snook, Willem Jasperse, Thomas Wegman; патентообладатель Dow Chemical Co. – № 94305105.2; заявл. 13.07.1994; опубл. 18.01.1995, Бюл. № 95/03, – 14 с.
3. Пат. 2429258 Российская Федерация, МПК C08L69/00, B32B27/36, C08G64/20, C08G64/06, C08J5/18. Светорассеивающая полимерная композиция с высокой яркостью и ее применение в плоских экранах [Текст] / Пудляйнер Х., Майер К., Никель, Рюдигер К.; патентообладатель Байер Материалсайдэнс АГ. – № 2008117302/05; заявл. 22.09.2006; опубл. 12.04.2007, Бюл. № 26. – 17 с.
4. Пат. US6348960B1, МПК G02B5 / 0242. Front scattering film / Hideki Etori, Toshihiro Koike, Yasunori Sugiyama; патентообладатель Kimoto and Co Ltd. – № 09/433.929; заявл. 04.10.1999; опубл. 19.02.2002, – 11 с.
5. Diasphere // kolonindustries URL: [http://www.kolonindustries.com/Eng/Product/product03\\_13.asp](http://www.kolonindustries.com/Eng/Product/product03_13.asp) (дата обращения: 07.04.19).
6. Инновационные добавки Momentive // Полимерные материалы. Изделия. Оборудование. Технологии. – 2019. – №1 (236). – С. 13.
7. Современные материалы для производства светотехники: полимеры и светорассеивающие добавки для успешного бизнеса // ЮСИДЖИ URL: <https://ucgrus.com/statyi/sovremennye-materialy-dlya-proizvodstva-svetotekhniki-polimery-i-svetorasseivayushchie-dobavki-dlya/> (дата обращения: 07.04.19).
8. Яровая О.А., Лазарева Т.К., Андреева Т.И., Кравченко Т.П. Композиционные материалы светотехнического назначения из полистирола // Успехи в химии и химической технологии. – 2011.
9. Fayzullin I.Z., Volfson S.I., Musin I.N., Fayzullin A.Z., Grachev A.N., Pushkin S.A. The physicomechanical and rheological characteristics of wood-polymer composites based on thermally and mechanically modified filler. International Polymer Science and Technology, 2017, Vol. 44, No. 2, P. 39–43.
10. Fayzullin I.Z., Volfson S.I., Musin I.N., Fayzullin A.Z., Nikiforov A.A. Influence of the type of wood flour and nano-additives on structure and mechanical properties of wood polymer composites based on polypropylene. Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2016) AIP Conf. Proc. 1785, 040098-1–040098-6; doi: 10.1063/1.4967155 Published by AIP Publishing.
11. Самороков В.Э., Зелинская Е.В. Использование микросфер в композиционных материалах // Вестник ИргТУ. – 2012. – №9.
12. Microspheres Europe Program & Surface Treated Microspheres // koboproductsinc URL: <http://www.koboproductsinc.com/downloads/kobo-microspheres-europe.pdf> (дата обращения: 07.04.2019).
13. Микросферы Glass Bubbles // 3mrusia URL: [https://www.3mrusia.ru/3M/ru\\_RU/company-ru/all-3m-products/](https://www.3mrusia.ru/3M/ru_RU/company-ru/all-3m-products/) (дата обращения: 07.04.2019).
14. Теряева Т.Н., Костенко О.В., Исмаилов З.Р., Шикина Н.В., Рудина Н.А., Антипова В.А. Физико-химические свойства алюмосиликатных полых микросфер // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013.
15. Ксантос М. Функциональные наполнители для пластмасс. / Пер. англ. под ред. Кулезнева В.Н. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 462 с.
16. Горелов В.П., Горелов С.В., Горелов В.С., Григорьев Е.А. Конструкционные электротехнические материалы. – Directmedia, 2016, 341с.
17. Рудин А.В., Евстифеев В.В., Костина Н.В., Першенков П.П. Механика. Методические указания к выполнению лабораторной работы «Определение плотности твердого тела методом гидростатического взвешивания». – Пенза: 2005, 15 с.
18. Беспалов Ю.А., Коноваленко Н.Г. Многокомпонентные системы на основе полимеров. – Л.: Химия, 1981.