

УДК 547.535.36

ЭФФЕКТЫ СВЕТОРАССЕЯНИЯ В ПЛАСТМАССОВОМ СЦИНТИЛЛЯТОРЕ**Н.П. Хлапова¹, Я.С. Шпилевой², В.Г. Сенчишин², А.П. Гаврик¹, Н.С. Луцай¹,
В.Н. Лебедев²**¹Харьковский Национальный университет им. В.Н.Каразина, пл.Свободы 4, Харьков 61007²Институт «Монокристаллы», НАН Украины, пр.Ленина 60, Харьков 61001

Поступила в редакцию 1 ноября 2007г.

С целью выяснения механизмов ослабления света в пластмассовом сцинтилляторе (ПС) на серии образцов, отличающихся режимом полимеризации, исследованы их абсорбционные и рассеивающие свойства. Проведен численный анализ оптических потерь в сцинтилляторе на полистирольной основе стандартного состава (98,5%PST + 1,5% p-TP + 0,02% ROPOR). Приведены результаты измерения спектрального светорассеяния, объемной длины ослабления света и уровня внутренних напряжений в образцах ПС. Показана возможность количественной оценки вкладов абсорбционных потерь, рассеяния Релея и рассеяния Лява-Ми в суммарные оптические потери ПС. Наблюдаемое в образцах с дополнительным отжигом резкое снижение релеевской составляющей потерь (с 1850 до 380 дБ/км) объясняется уменьшением локальной гетерогенности полимерной матрицы данных образцов ПС, благодаря снижению в них уровня внутренних «замороженных» деформаций макромолекул.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пластмассовый сцинтиллятор, прозрачность, моделирование спектральных потерь, светорассеяние, внутренние напряжения, высокотемпературный отжиг.

В современных экспериментах физики высоких энергий для регистрации частиц, в качестве базовых детекторов, как правило, используются широкоапертурные электромагнитные и адронные калориметры. Сложные конструкции калориметров типа сэндвич, (с ячеистой или плоскостной структурой) включают в себя десятки и сотни тысяч элементарных счетчиков. Роль таких счетчиков чаще всего выполняют эффективные пластмассовые сцинтилляторы (ПС). Так, отечественные сцинтилляторы на полистирольной основе серии UPS (Ukrainian Plastic Scintillator) успешно используются в крупнейших мюонных системах детектирования: CMS (Compact Muon Solenoid) [1], LHCb (Large Hadron Collider) [2] и ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) [3]. Существенным требованием, предъявляемым к ПС при их использовании является требование высокой прозрачности. Особенно это важно в калориметрии при измерении энергии частиц адронного ливня, проходящего через широкие полосы ПС длиной до 5м. Естественно, что только при очень высокой прозрачности такого крупногабаритного сцинтиллятора, можно получить хорошую однородность светосбора и добиться высокого энергетического разрешения детектора. В настоящее время требованию высокой прозрачности в полной мере не удовлетворяет ни один из известных ПС. Так, для крупногабаритных ПС отечественного производства UPS-923А и лучшего зарубежного аналога BC-408 (BICRON) значение объемной длины ослабления света (BAL) колеблется в пределах от 150 до 350 см. Причиной невысокой прозрачности существующих ПС являются, во-первых, поглощающие примеси, обычно присутствующие в исходном мономерном сырье, во-вторых, различного рода рассеивающие центры (структурные дефекты, включения, пористость и т.п.), возникающие в процессе получения ПС. Решение ряда проблем, связанных с абсорбционными потерями, позволило, при разработке технологии получения крупногабаритных полистирольных сцинтилляторов, в несколько раз понизить уровень потерь в сцинтилляционном материале и достичь 2-3-х метровой прозрачности [4].

Цель настоящей работы заключалась в поиске путей уменьшения оптических потерь в ПС из-за другого важного фактора ослабления света в оптически прозрачной полимерной среде - из-за рассеяния.

Известно, что оптически прозрачные и явно аморфные полимеры - полистирол, поливинилтолуол (PVT), полиметилметакрилат (PMMA) дают незначительное, несущественное для многих применений рассеяние. Однако это справедливо только для полимеров с исключительно высокой локальной однородностью материала. В общем же случае матрица аморфного полимера представляет собой сложную систему с распределенными в ней крупными и мелкими рассеивающими центрами. При этом характер неоднородностей, ответственных за рассеяние, определяется не только природой и строением макромолекул, но и типом надмолекулярных образований, формирующихся в процессе полимеризации и сильно зависящих от условий его проведения. В соответствии с современными представлениями, матрица аморфных полимеров может состоять либо из глобул – свернутых в клубок макромолекул ("coil-model") [5], либо из пачек, образованных параллельной укладкой полимерных цепей ("bundle-model") [6]. И в одном и в другом случае, из-за возможных различий в локальной упаковке макромолекул, в микрообластях полимерной матрицы могут возникнуть сгустки и разрежения вещества, т.е. будет иметь место флуктуация плотности. Именно неоднородности этого типа и являются, как известно, ответственными за рассеяние аморфных полимеров. Так, при среднем значении флуктуации плотности $(\eta^2)^{1/2} = 2,7610^{-4}$, интенсивность рассеяния в PMMA, согласно Дебаю [7], оказывается на порядок

выше рассеяния на малых неоднородностях (типа глобул) и на два порядка выше рассеяния на тепловых флуктуациях. Результаты других многочисленных экспериментов подтверждают, что даже незначительная локальная гетерогенность полимерной матрицы может привести к большому эффекту в светорассеянии [8-11]. Этим, очевидно, объясняется и тот факт, что изотропное рассеяние аморфных полимеров обычно варьируется в очень широких пределах. По данным [9], в зависимости от условий получения, изотропное рассеяние в РММА может изменяться от граничных потерь $\beta = 9$ дБ/км до $\beta = 400$ дБ/км (β – показатель ослабления света в дБ/км, $\beta = 4,3 \times 10^5 \cdot \text{BAL}^{-1}$ дБ/км).

В настоящей работе представлены результаты исследования оптических потерь из-за рассеяния в ПС, полученных по двум различным режимам, отличающихся условиями высокотемпературного отжига процесса полимеризации крупногабаритного блока. Показано, что путем варьирования температурно-временного режима отжига сцинтилляционного блока, потери из-за рассеяния могут быть значительно уменьшены.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы ПС были изготовлены из двух крупногабаритных сцинтилляционных блоков (размером $100 \times 120 \times 300$ см), полученных по 2-м различным температурно-временным режимам процесса полимеризации. Основные отличия процессов заключались в значениях достигаемых в 1-ом и во 2-ом случаях максимальных температур (T_{\max}), а также в различном времени выдержки при T_{\max} и при температуре стеклования - T_g ($T_g \sim 85^\circ\text{C}$). Кроме этого, скорость снижения температуры вблизи T_g – по первому режиму составляла 3, а по второму -1,5°/ч. Состав сцинтилляционных композиций в обоих случаях был одинаковым и соответствовал стандартному составу полистирольных сцинтилляторов серии UPS: 98,5% полистирола (PST) и две люминесцентные добавки – 1,5% паратерфенила (рТР) и 0,02% фенилоксазилбензола (РОРО). Измерения интегрального светопропускания образцов осуществлялись на дулучевом шаровом фотометре ФМШ-56 с использованием светофильтров с максимумами пропускания на 400, 434, 490, 540, 582, 612 и 750 нм. При регистрации рассеянного светового потока прямой пучок света перекрывался световой ловушкой (черным бархатом) и интенсивность рассеяния определялась количеством света, отклоненного от направления падающего параллельного пучка в среднем более, чем на $2,5^\circ$. Величина этого угла определяется размером диафрагм перед источником света и перед фотоэлементом используемого прибора. Это соответствует общим требованиям по определению светопропускания полимерных материалов [12]. Образцы для данных измерений имели форму плоских пластин одинаковой толщины (20 мм). Размер пластины подбирался таким образом, чтобы она полностью перекрывала входное отверстие шара ФМШ-56 ($20 \times 30 \times 50$ мм). Образцы не содержали видимых посторонних включений, пузырей и трещин. Поверхность пластин после шлифования и полировки также не содержала видимых дефектов (сколов, выбоины и т.д.). Измерения объемной длины ослабления света (BAL) проводились на фотометрической установке с лазером на парах кадмия ($\lambda_{\max} = 441,6$ нм). Образцы для измерения BAL были изготовлены в форме цилиндров длиной 50 см. Торцы цилиндров тщательно полировались. Сравнение уровня напряжений в образцах ПС проводилось с помощью кругового полярископа КПС-115. По измеренному значению оптической разности хода при нормальном просвечивании поляризованным светом плоских образцов ПС рассчитывалась разность главных напряжений в продольном и поперечном направлении пластины. Образцы для измерений на КПС-115 в форме плоских пластин с отполированными поверхностями имели размеры $100 \times 100 \times 10$ мм. Пластины изготавливались из аналогичных частей каждого из двух крупногабаритных блоков (из центральной и удаленных от центра).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка спектральных потерь в ПС

Для оценки полных спектральных потерь в ПС использовали простую математическую модель, представляющую собой сумму нескольких дискретных математических моделей. Каждая из этих моделей соответствовала известным механизмам ослабления света в оптически прозрачных средах. Одна из моделей описывала оптические потери от длинноволнового края УФ-поглощения, другая – от края ИК-поглощения, а третья модель соответствовала оптическим потерям из-за рассеяния. Такое представление оптических потерь было выражено следующим простым уравнением:

$$\beta = \beta_s + \beta_{uv} + \beta_{ir}, \quad (1)$$

где β – полные потери, β_s – потери света из-за рассеяния; β_{uv} и β_{ir} – вклады в потери от краёв УФ- и ИК-абсорбционных полос, соответственно.

Обычно УФ- и ИК-поглощение моделируются экспоненциальными функциями [13, 14]:

$$\beta_{uv} = K_{uv} \times \exp(C_{uv} / \lambda), \quad (2)$$

$$\beta_{ir} = K_{ir} \times \exp(C_{ir} / \lambda), \quad (3)$$

где K_{uv} , K_{ir} и C_{uv} и C_{ir} – константы. Край полосы УФ-поглощения, согласно расчетам и экспериментальным данным, вносит в общие потери прозрачных полимеров не более 100 дБ/км, а потери из-за ИК-поглощения не превышают 1-2 дБ/км [14]. В табл.1 представлены типичные значения констант K_{uv} и C_{uv} , входящих в (1), для

наиболее прозрачных полимерных материалов - полиметилметакрилата (PMMA) и полистирола (PST) [8], а также для кварцевого стекла [15]. В таблице также указаны значения оптических потерь в этих материалах, рассчитанные для $\lambda = 500$ нм.

Таблица.1. Параметры экспоненциальной функции, описывающей потери от края УФ-поглощения в оптически прозрачных средах [7, 8].

Параметры	PST	PMMA	Кварцевое стекло
K_{UV} , дБ/км	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,58 \times 10^{-12}$	$1,1 \times 10^{-4}$
C_{UV} , нм	8×10^3	$1,15 \times 10^4$	$4,9 \times 10^3$
β_{UV} (дБ/км) ($\lambda=500$ нм)	100	0,15	2

Вклад оптических потерь, обусловленный рассеивающими свойствами материала, тоже хорошо известен [13, 14] и моделируется следующим уравнением:

$$\beta_s = A \times \lambda^{-4} + B, \quad (4)$$

где β_s – потери света из-за рассеяния, A и B постоянные. Первое слагаемое в (4) описывает рассеяние Релея (рассеяние на частицах малых размеров $d \leq \lambda/20$), а второе – определяет рассеяние Лява-Ми (рассеяние на крупных частицах, $d \geq \lambda$).

На основе рассмотренных механизмов ослабления света в ОПП, были рассчитаны суммарные оптические потери в сцинтилляционной композиции в диапазоне 380÷480 нм. Для ПС, содержащего 97,5 % PST, 1,5% рТР, 0,02% РОРОР и 1% мономера стирола (ST), были оценены абсорбционные потери, вносимые материалом полимерной матрицы – полистиролом, а также потери, вносимые люминесцирующими добавками (1,5% р-ТР и 0,02% РОРОР) и остаточным мономером стирола (~1% ST). Оценка выполнялась путем экстраполяции “хвостов” собственного электронного поглощения компонентов ПС в длинноволновую область по закону Гаусса. Графики соответствующих компонентов потерь в ПС из-за края УФ-поглощения в диапазоне 380÷480 нм, показаны на рис.1. Используя данные [8] по релеевскому светорассеянию полистирола на длине волны $\lambda = 633$ нм, были рассчитаны потери в PST из-за рассеяния для выбранного диапазона волн (380÷480 нм). График этих потерь тоже показан на рис.1. Как видно из этого рисунка, большую часть внутренне свойственных ПС оптических потерь в диапазоне 380÷480 нм составляют потери из-за релеевского рассеяния.

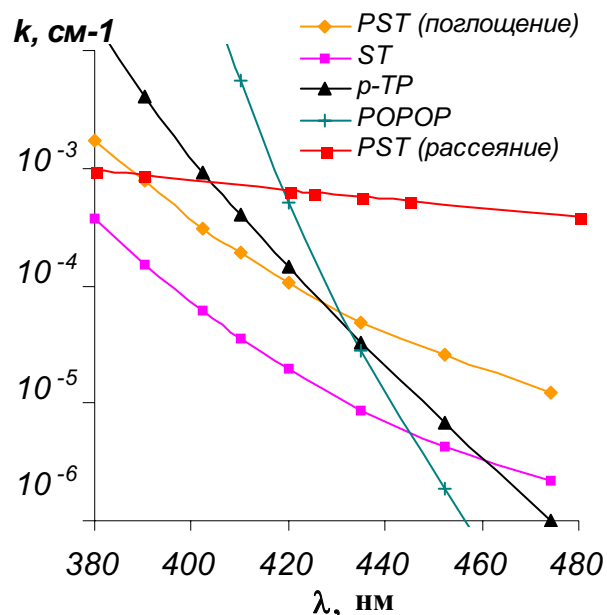


Рис.1. Показатели ослабления света из-за УФ-поглощения и релеевского рассеяния в ПС, содержащего 97,5 % PST, 1,5% рТР, 0,02% РОРОР и 1% ST.

Оценка оптических потерь в ПС вблизи эмиссионного максимума ($\lambda = 420$ нм) дает для релеевского рассеяния значение ~ 300 дБ/км, а для абсорбционных потерь - менее 200 дБ/км. Общий уровень потерь составляет около 500 дБ/км. Таким образом, рассчитанный предел прозрачности ПС стандартного состава (для $\lambda = 420$ нм) составляет почти 10 м ($BAL \approx 10$ м).

Как следует из нижеприведенных данных, значения прозрачности полистирольных сцинтилляторов, изготовленных нами из 2-х различных крупногабаритных блоков, оказались в несколько раз меньше рассчитанного предела. Экспериментально измеренные на лазерной установке ($\lambda_{max} = 441,6$ нм), значения объемной длины ослабления света составили для образцов первой серии – 1,5 м ($BAL_{(1)} = 150$ см), а для второй – 3,5 м ($BAL_{(2)} = 350$ см).

Соответствующие оптические потери, рассчитанные по измеренным значениям BAL, для образцов первой серии ПС составили 2870 дБ/км ($\beta_{общ. (1)} = 2870$ дБ/км), а для второй – 1270 дБ/км ($\beta_{общ. (2)} = 1270$ дБ/км).

Спектральное светорассеяние ПС

Для определения роли эффектов рассеяния в общем механизме ослабления света с помощью интегрирующей сферы ФМШ-56 на исследуемых образцах ПС были проведены измерения интегрального светопропускания и спектрального светорассеяния. Измерения проводились на подготовленных тонкостенных

пластинах ПС (по 5 образцов каждой серии). Оценку оптических потерь в ПС из-за рассеяния проводили по показателю ослабления β_s (дБ/км):

$$\beta_s = 4,34 \times \tau \times 10^5, \quad (5)$$

здесь τ - коэффициент экстинкции (мутность среды) в см^{-1} . Поскольку мутность является мерой ослабления света при его прохождении через среду, она эквивалентна общему рассеянному излучению, т.е. коэффициент экстинкции τ и экспериментально измеряемая величина dI (dI - часть светового потока, отклоненная рассеянием от первоначального направления) связаны между собой простым соотношением

$$\tau = dI / (I_s \times dx). \quad (6)$$

Для конечного оптического пути x справедливым будет:

$$\ln(I_0 / I_s) = \tau \times x, \quad (7)$$

где I_0 - интенсивность первичного светового потока, dI - потеря энергии падающего света в результате рассеяния, I_s - интенсивность рассеянного светопропускания ($I_s = I_0 - dI$). После определения I_s , по (7) вычисляли коэффициент экстинкции τ , и затем по (5) - оптические потери β_s в образцах ПС. После обработки экспериментальных данных по усредненным значениям были получены профили спектральных потерь $\beta_s(\lambda)$ для образцов ПС первой и второй серии (рис.2).

Для оценки вкладов релеевского рассеяния и рассеяния Лява-Ми в общее светорассеяние был проведен анализ спектральных потерь $\beta_s(\lambda)$ с использованием аппроксимирующей функции (4). Для определения параметров A и B (4), данные о спектральных потерях (рис.2) преобразовали от линейной шкалы длины волны к шкале λ^{-4} и применили линейную регрессию (рис.3). Как видно из рис.3, спектральные зависимости светорассеяния образцов ПС (1-й и 2-й серии) хорошо описываются выбранной функцией.

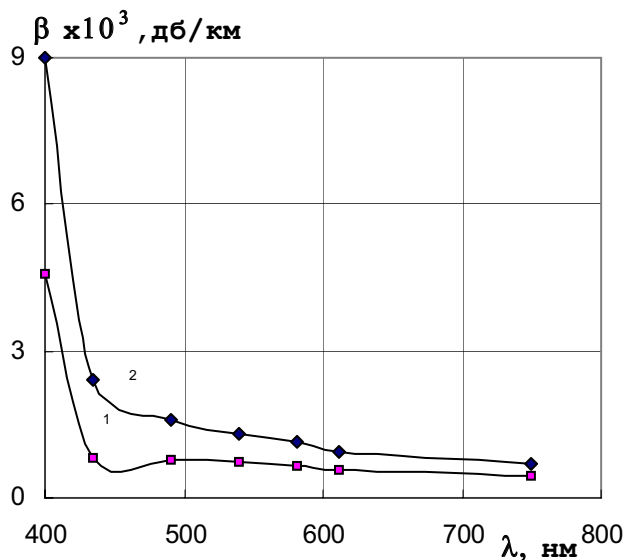


Рис.2. Спектральные потери светорассеяния в образцах ПС первой (1) и второй (2) серии.

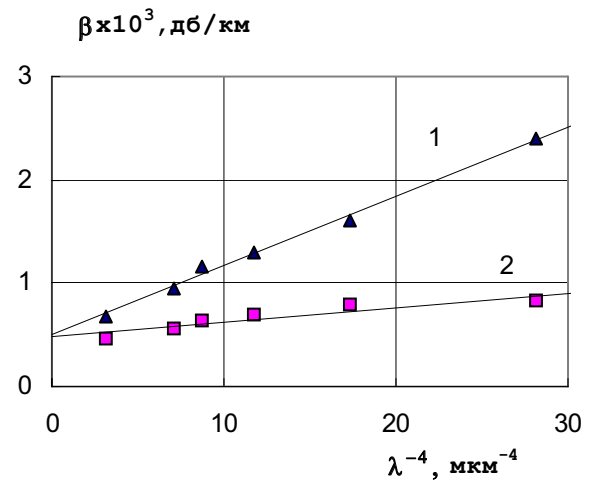


Рис.3. Спектральные зависимости оптических потерь на рассеяние $\beta_s(\lambda^{-4})$ в образцах ПС первой (1) и второй (2) серий

Вклад рассеяния Лява-Ми определялся путем экстраполяции спектральной зависимости $\beta_s(\lambda^{-4})$ в длинноволновую часть спектра. Отсекаемый на оси ординат отрезок дает значение параметра B (4), характеризующего потери света из-за рассеяния на крупных частицах. Определенный таким образом вклад рассеяния Лява-Ми оказался практически одинаковым для двух серий образцов и составил ~ 450 дБ/км. Для определения релеевской составляющей рассеяния сначала по тангенсу угла наклона прямых на рис. 3, определялось значение параметра A (4). Для образцов 1-ой серии это значение составило ~ 67 , а для 2-ой серии – 14 дБ/км \cdot мкм $^{-4}$. Затем, в соответствии с первым слагаемым (4), для $\lambda = 434$ нм (эмиссионный максимум ПС), рассчитывались релеевские потери. Для первой серии образцов они составили 1876 , а для второй – 350 дБ/км. Приведенные оценки потерь показывают, что и в первом случае и во втором случае неизменной компонентой рассеяния оставалось рассеяние Лява-Ми. Превалирующая в первом случае составляющая светорассеяния - рассеяние Релея, во втором случае - после изменения условий проведения высокотемпературного отжига сцинтилляционного блока - уменьшилась в несколько раз. Это наглядно демонстрируется на рис.3. При

сравнении 2-х графиков обнаруживается явно разный наклон аппроксимирующих прямых и практически одинаковое положение точки пересечения прямых с осью β .

Результаты проведенных в настоящей работе измерений и расчетов оптических характеристик ПС представлены в табл.2, в которой также указаны параметры температурно-временного режима заключительной стадии процесса полимеризации. В таблице приведены общие оптические потери $\beta_{\text{общ}}$ образцов ПС первой и второй серии, рассчитанные по результатам измерений объемной длины ослабления на лазерной установке. Представлены оптические потери из-за рассеяния (β_s), определенные по измерениям на ФМШ-56 для $\lambda = 434$ нм, а также значения индивидуальных вкладов в оптические потери релеевского рассеяния ($\beta_{\text{Релея}}$), и рассеяния Лява-Ми ($\beta_{\text{Лява-Ми}}$). Здесь же приведены и абсорбционные потери ($\beta_{\text{УФ}}$), рассчитанные по (1) и (4).

Таблица 2. Оптические потери в образцах ПС, полученных при различных режимах высокотемпературного отжига процесса полимеризации

ПС	Условия проведения отжига в процессе полимеризации			Оптические потери, β , (дБ/км)				
	T_{max} , °C	Выдержка при T_{max} , ч	Выдержка при T_g , ч	$\beta_{\text{общ}}$	β_s	$\beta_{\text{Релея}}$	$\beta_{\text{Лява-Ми}}$	$\beta_{\text{УФ}}$
1	160	36	10	2870	2350	1850	500	520
2	170	48	15	1270	830	380	450	400

Как видно из табл.2, прозрачность ПС в большей степени определяется уровнем потерь из-за рассеяния света, чем его абсорбционными потерями. Так, для 1-ой серии образцов потери из-за рассеяния составили более 80% от общих потерь, а для 2-ой - 65%. Однако наибольший интерес представляют результаты по изменению отдельных компонентов потерь светорассеяния после изменения условий проведения высокотемпературного отжига. Изменения $\beta_{\text{Лява-Ми}}$ не превысили 10%, а релеевские потери ($\beta_{\text{Релея}}$) уменьшились почти в 5 раз.

Принимая во внимание одинаковые условия подготовки сырья и одинаковую степень чистоты используемого оборудования (полимеризатор, ампулы, помещение и т.п.), можно предположить, что концентрация крупных рассеивающих центров (пыль, посторонние включения и т.п.) и поглощающих примесей в ПС была практически одинаковой в обоих случаях. Такое предположение может объяснить факт неизменности абсорбционных потерь и потерь из-за рассеяния Лява-Ми.

Неожиданно большое влияние высокотемпературного отжига на релеевскую составляющую оптических потерь может свидетельствовать в пользу ее структурной природы. Действительно, как подтверждают экспериментальные данные [16-18], характерной чертой структурных неоднородностей в полимерном материале является сильное влияние на их концентрацию и распределение условий проведения процесса полимеризации. Особенно сильно это влияние проявляется на той стадии, когда реакционная масса переходит из вязко-текучего в стеклообразное состояние и когда формируется надмолекулярная структура полимера. Этим завершающим этапом полимеризации определяется и взаимное расположение сегментов в макромолекуле, т.е. конформация отдельных макромолекул, и пространственное расположение полимерных цепей в целом. При оптимальных условиях макромолекулы принимают энергетически выгодную и практически одинаковую конформацию (например, форму клубков), и их агрегирование (образования типа доменов) оказывается однородным по всему объему. При беспорядочном распределении элементов такой структуры, как система в целом, так и каждый ее участок (с достаточно большим числом элементов) оказываются оптически изотропными, без заметного рассеяния. Предполагается, что большой избыток рассеяния вызывается, в основном, изотропной составляющей неоднородно деформированного состояния полимера. Именно такое состояние обычно и реализуется в полимерных материалах, полученных методом блочной полимеризации. Из-за трудностей теплоотвода и неизбежных при этом температурных градиентов в полимерном блоке возникают большие внутренние напряжения - сжимающие, сдвиговые, растягивающие. Релаксируют эти напряжения с разными скоростями и их распределение по всему объему оказывается крайне неоднородным. Макромолекулы, деформированные под действием подобных напряжений, образуют систему с высокой локальной гетерогенностью. Направленное изменение технологического режима полимеризации с целью уменьшения возникающих напряжений позволяют, по крайней мере, частично, устранить, трудно поддающиеся учету, деформации макромолекул. Это положение подтверждают приведенные ниже результаты наблюдения напряженного состояния в исследуемых образцах ПС.

По измеренному на круговом полярикопе КПС-115 значению оптической разности хода (δ), в соответствии с уравнением Вертгейма [19], рассчитывалась разность главных напряжений в плоских пластинах ПС:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \delta / Cd, \quad (8)$$

где δ – оптическая разность хода, C – оптический коэффициент напряжения в полистироле ($C = 5,57 \times 10^{-7}$ см²/кг), $\sigma_1 - \sigma_2$ – разность главных напряжений в продольном и поперечном направлении пластины, d – толщина пластины,

в см. Затем определялись максимальные тангенциальные напряжения (τ_{max}) в образцах:

$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2. \quad (9)$$

Результаты измерений показали, что в образцах первой серии (при недостаточно высокой температуре отжига и быстром охлаждении крупногабаритного блока) оптическая разность хода достигала ~ 300 нм/см, а в образцах второй серии она не превышала ~ 70 нм/см. Соответственно, уровень максимальных напряжений в образцах первой серии достигал 2,74 МПа. Напротив, в образцах второй серии - при более продолжительном высокотемпературном отжиге ($T_{max} \gg T_g$) и при достаточно медленном охлаждении блока - уровень напряжений не превысил 0,65 МПа. Следует также отметить, что уровень напряжений образцов, изготовленных из различных частей блока для образцов 2-ой серии, отличается всего в 1,5 раза, а у образцов 1-ой серии более чем в 2,5 раза. Влияние на уровень внутренних напряжений в готовых пластинах ПС условий проведения заключительной стадии процесса полимеризации хорошо видно на приведенной гистограмме (рис.4).

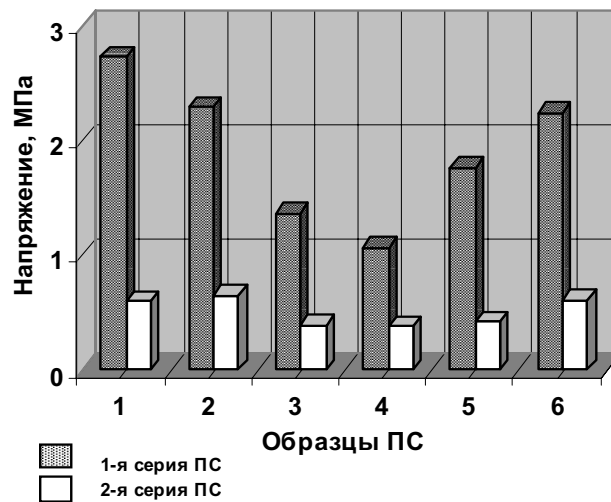


Рис.4. Гистограмма распределения остаточного внутреннего напряжения в образцах ПС (3,4-образцы из центральной части блока; 1,2,5,6- из удаленной от центра части блока)

Для лучшего сравнения образцы ПС двух серий (по 6 образцов каждой серии) расположены на рис. 4 парно, в соответствии с тем, из какой части блока (центральной или удаленной от центра) они изготовлены. Как видно из рисунка, для всех образцов 2-ой серии (с улучшенным режимом отжига) значения напряжений оказались в 3-4 раза меньше, чем у образцов 1-ой серии.

Таким образом, на основе полученных в работе экспериментальных данных и проведенных расчетов можно заключить, что основной причиной оптических потерь в ПС являются потери из-за светорассеяния. Показано, что направленная оптимизация технологического режима полимеризации - увеличение времени выдержки при T_{max} и более медленное охлаждение крупногабаритного блока вблизи температуры стеклования (T_g) - может значительно улучшить прозрачность ПС. Снижение общего уровня потерь в ПС более, чем в 2 раза удалось добиться за счет уменьшения доминирующих в ослаблении света релеевских потерь - с 1850 до 380 дБ/км. Объяснением наблюдаемого эффекта является, на наш взгляд, уменьшение при дополнительном отжиге внутренних "замороженных" деформаций макромолекул и улучшение, вследствие этого, оптической изотропности среды.

ВЫВОДЫ

Проведен численный анализ оптических потерь в ПС (98,5% PST + 1,5% p-TP + 0,02% РОРОР), связанных с длинноволновым краем собственного УФ-поглощения и рассеянием Релея.

На основе упрощенной модели определены отдельные компоненты светорассеяния - рассеяние Релея и рассеяние Лява-Ми. Представлены результаты измерения спектрального светорассеяния в образцах ПС, полученных по 2-м различным режимам процесса полимеризации.

Показано, что прозрачность крупногабаритных ПС может быть значительно улучшена путем совершенствования технологического режима высокотемпературного отжига процесса полимеризации. Увеличение времени выдержки при T_{max} и T_g и более медленное охлаждение крупногабаритного блока позволило уменьшить доминирующие в ослаблении света релеевские потери с 1850 до 380 дБ/км и снизить общий уровень оптических потерь в ПС более, чем в 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal. CERN/LHCC 94-38, LHCC/P-1, printed in CERN, 1994. – 450p.
2. Design of Large Hadron Collider. CERN 91-03, printed in CERN, 1996. –270p.
3. Tile Calorimeter. Technical Design Report, CERN/LHCC 96-42, LHCC/P-1, printed in CERN, 1996. –320p.
4. Гринев Б.В., Сенчишин В.Г. Пластмассовые сцинтилляторы. – Х.: Акта, 2003. – 324 с.
5. Fischer E. W., Dettenmaier M. The conformation of the polymer chain in the bulk amorphous polymer glasses.// J. Non- Cryst. Solids – 1978. – Vol. 31. – P. 181–189.
6. Yeh G.S.J. The amorphous phase and molecular conformation in polymer glasses // J. Macromol. Sci. – 1972. – Vol.B6. – P. 465–476.
7. Debye P., Bueche A. M. Scattering by an Inhomogeneous Solid // J. Appl. Phys. – 1949. – Vol.20. – P. 518–525.
8. Kaino T., Fujiki M., Jinguji K. Preparation of Plastic Optical Fibers // Rev. Electr. Commun. Lab. – 1984. – Vol.32. –P.478– 488.
9. Koike Y. Light Scattering and Heterogeneities in Low- Less Poly (methylmethacrylate) Glasses // J. Macromol. Sci.- 1989. – Vol.22. – P.1367–1373.
10. Зубаков В.Г., Багдасарьян К.В., Кочилян А.В. Изотропное рассеяние в аморфных полимерах // Свойства и применение оптически прозрачных материалов. – Л., 1984. – С. 23-37.
11. Пахомов П.М., Зубков А.И., Хижняк С.Д., Влияние конфигурационного состава и структуры полимера на прозрачность оптического волокна // Высокомолек. соедин. А. – 1998. – Т.40, № 9. – С.1451–1457.
12. ГОСТ 15875-85. Пластмассы. Методы определения коэффициента пропускания и мутности. – М., 1985. – 8с.
13. Urbach F. The long-wavelength edge of photographic sensitivity absorption of solids // J. Phys. Rev. – 1953. – Vol.92. – P.1324–1327.
14. Stone F.T. Separation of total-loss date into its absorption and scattering components // J. Appl. Opt. – 1982. – Vol.21. – P.2721–2726.
15. Walker S.S. Rapid Modeling and Estimation of tal spectral Loss in optical Fibers // J. Lightwave Technology. – 1986. – Vol.4. – P.1125–1131.
16. Каргин В.А., Слонимский Г.Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров. – М.: Химия, 1967. – 231с.
17. Сандитов Д.С., Бартенев Г.М. Физические свойства неупорядоченных структур. – Новосибирск: Наука, 1982. – 256 с.
18. Слонимский Г.Л., Аскадский А.А., Китайгородский А.И. Об упаковке макромолекул в полимерах // Высокомолек. соедин. А. – 1973. – Т. 15, № 3. – С. 641–645.
19. Foppl Z., Monch E. Praktische Spannungsoptik. – Berlin: Springer, 1972. – 300 s.

EFFECTS OF LIGHT SCATTERING IN THE PLASTIC SCINTILLATOR

N.P. Khlapova¹, J.S. Shpilevoy², V.G. Senchishin², A.P. Gavrik¹, N.S. Lutsay¹, V.N. Lebedev²

¹Kharkov National University by V.N. Karazin, Svobody Sqr.4, Kharkov, Ukraine

²Institute for Single Crystals, NAS of Ukraine, Lenin Av.,60, Kharkov 61001, Ukraine

The experiments were fulfilled on a series of PS samples differing by regime of polymerization process. The computational analysis of optical losses in the plastic scintillator on a polystyrene basis of standard mixture (98,5%PST + 1,5% p-TP + 0.02% POPOP) was carried out. The results of measurement of spectral scattering, bulk attenuation length and the level of internal strains in the PS samples are presented. The possibility of quantitative estimation of contribution of absorptive losses – Rayleigh scattering and Love-Mie scattering to the summary optical losses of PS was shown. The observed drastic reduction of Relay component of losses (from 1850 to 380 dB/km) in the samples with "excess" annealing may be explained by decrease of local heterogeneity of polymer matrix of the present PS samples, due to the decrease of internal "frozen" macromolecular deformations in them.

KEY WORDS: plastic scintillator, transparency, modelling of spectral losses, light scattering, internal strains, high-temperature annealing.