УДК 678.01:535

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧЕСКИХ МАСС

Кочуров Д.В.
Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, г. Владимир, ул. Горького, 87),
E-mail: dkochurov95@mail.ru

Аннотация: Статья посвящена вопросам изучения оптических характеристик пластических масс при помощи различных методов определения. Описаны такие оптические характеристики пластических масс, как показатель преломления, прозрачность (мутность), динамооптическая чувствительность (фотоупругие свойства), окраска, визуальная оценка цвета, отражательная способность и глянец.

Уникальное сочетание свойств – превосходная чистота и прозрачность, стойкость к ударным нагрузкам, возможность получения изделий путем литья в форму, низкая стоимость – делают пластмассы в ряде случаев оптимальным выбором для конструктора. Сравнительно недавно пластмассы нашли применение для изготовления более ответственных изделий, например, контактных линз, призм, линз в дешевых камерах, увеличительных стекол. Пластмассы более стойки к удару по сравнению с неорганическими стеклами. Однако отсутствие размерной стабильности в широком диапазоне температур и плохая стойкость к нанесению царапин препятствуют расширению применения пластмасс в таких областях, как линзы дорогих камер, микроскопы и другие изделия точной оптики, где традиционно используют обычные стекла.

Почти все пластмассы, если толщина изготовленного из них изделия ниже некоторого предела, становятся полупрозрачными. И только некоторые пластмассы полностью прозрачны. Является ли пластмасса прозрачной или полупрозрачной зависит от структуры полимера. Вообще говоря, все аморфные пластмассы прозрачны. Кристалличность способствует увеличению плотности материала, что снижает скорость распространения света и приводит к возрастанию показателя преломления. Если размер кристалла становится больше, чем длина видимого света, то луч света, проходя через множество кристаллических и аморфных областей, рассеивается, и прозрачность материала уменьшается. Большие единичные кристаллы рассеивают свет под широкими углами, и это приводит к появлению мутности. Как правило, частично кристаллические полимеры полупрозрачны. Однако их прозрачность может быть улучшена путем закалки или статистической сополимеризации. К числу основных оптических свойств относятся: показатель преломления; светопропускание и мутность; фотоупругие свойства; цвет; внешний блеск (отражательная способность).

Ключевые слова: *оптические характеристики, пластические массы, показатель преломления, прозрачность, мутность, динамооптическая чувствительность, окраска, оценка цвета, отражательная способность, глянец.*

UDC 678.01:535

METHODS OF DETERMINING OPTICAL CHARACTERISTICS OF PLASTIC MASSES

Kochurov D.V.
Vladimir state university of A.G. and N.G. Stoletovs (600000, Vladimir, Gorky street, 87),
E-mail: dkochurov95@mail.ru

Abstract: The article is devoted to the study of the optical characteristics of plastic masses using different methods of determination. Described are optical characteristics of plastics as refractive index, transparency (turbidity), dynamooptical sensitivity (photoelastic properties), painting, visual assessment of color, reflectivity and gloss.

The unique combination of properties-excellent purity and transparency, resistance to impact, the ability to produce products by casting, low cost – make plastics in some cases the best choice for the designer. Relatively recently, plastics have been used for the manufacture of more critical products, such as contact lenses,

prisms, lenses in cheap cameras, magnifying glasses. Plastics are more resistant to impact than non-organic glasses. However, the lack of dimensional stability over a wide temperature range and the high resistance to scratching prevent the expansion of the use of plastics in areas such as lenses of expensive cameras, microscopes and other fine optics, which traditionally use conventional glass.

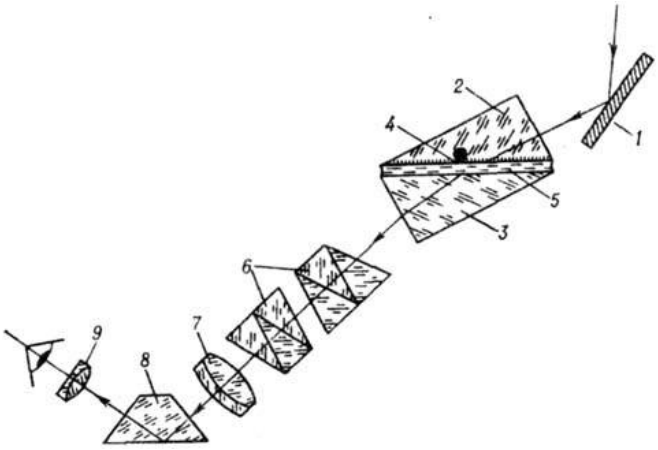
Almost all plastics, if the thickness of the product made of them below a certain limit, become translucent. And only some plastics are completely transparent. Whether plastic is transparent or translucent depends on the polymer structure. Generally speaking, all an amorphous-wide transparent plastic. Crystallinity increases the density of the material, which reduces the speed of light propagation and leads to an increase in the refractive index. If the size of the crystal becomes larger than the length of the visible light, the light beam passing through a set of crystal and amorphous areas is scattered and the transparency of the material decreases. Large single crystals scatter light at wide angles, and this leads to turbidity. As a rule, partially crystalline polymers are translucent. However, their transparency can be improved by hardening or statistical copolymerization. The main optical properties include: refractive index; light transmission and turbidity; photoelastic properties; color; the gloss (reflectivity).

Keywords: *optical characteristics, plastic masses, refractive index, transparency, turbidity, dynamooptic sensitivity, coloration, color estimation, reflectivity, gloss.*

Показатель преломления (ASTM D542, ИСО 489). Показатель преломления представляет собой фундаментальную характеристику прозрачных материалов. Величина показателя преломления играет первостепенную роль для конструктора при разработке линз для камер, микроскопов и других оптических систем. Показатель преломления, также называемый индексом рефракции, определяется как отношение скоростей света в вакууме (или в воздухе) и в данной среде: Показатель преломления = синус угла падающего луча света / синус угла преломленного луча света. Показатель преломления большинства пластмасс очень близок к показателю преломления стекла.

Существуют два основных метода измерения показателя преломления. Первый метод, называемый рефрактометрическим, основан на использовании рефрактометра. Альтернативный метод состоит в использовании микроскопа не менее чем с 200-кратным увеличением. Рефрактометрический метод более предпочтителен по сравнению с микроскопическим, поскольку он дает более точные результаты. Точность микроскопического метода зависит от квалификации оператора при фокусировке изображения, и поэтому он менее точен [4].

Рефрактометрический метод. Для измерения показателя преломления наиболее часто используют рефрактометр Аббе (рисунки 1 и 2). Для проведения измерений требуется источник белого света и контактная жидкость, которая не должна взаимодействовать с поверхностью полимера. Показатель преломления этой жидкости должен быть заведомо выше, чем у исследуемого полимера. Образец может быть любых размеров, он лишь должен хорошо примыкать в поверхности фиксированной половины призмы рефрактометра. Поверхность образца, находящаяся в контакте с призмой, должна быть оптически плоской и полированной [4].



1 – осветительное зеркало; 2 – вспомогательная откидная призма; 3 – основная измерительная призма; 4 – матированная грань откидной призмы; 5 – исследуемая жидкость; 6 – призмы компенсатора Амичи; 7 – объектив зрительной трубы; 8 – поворотная призма; 9 – окуляр зрительной трубы

Рисунок 1. – Оптическая схема рефрактометра Аббе [1]

Испытания состоят в том, что образец приводится в соприкосновение с призмой, путем введения между ними каплю контактной жидкости. Как уже говорилось, показатель преломления этой жидкости должен быть выше, чем у исследуемого образца. Далее, наблюдая через окуляр и вращая рукоятку настройки, смещают линию тени так, чтобы она попала в поле наблюдения. Корректор дисперсии настраивают таким образом, чтобы устранить все цвета с линии тени. Граница между светом и тенью должна быть резкой с четким разделением белого поля и небелого фона. На заключительной стадии эксперимента край границы тени совмещается с перекрестием волосяных линий, и значение показателя преломления считывается с дисплея [4].

Рисунок 2. – Рефрактометр Аббе [5]

Микроскопический метод. При применении этого метода необходимо иметь микроскоп не менее чем с 200-кратным увеличением. Образец должен иметь удобные размеры. Две противоположные поверхности должны быть параллельны и гладко отполированы. Испытания состоят в том, что производится попеременная фокусировка на верхнюю и нижнюю поверхности образца, что позволяет достаточно точно определить продольное смещение на линзе. Разница между двумя отсчетами представляет собой кажущуюся толщину образца. Тогда показатель преломления рассчитывается по формуле: Показатель преломления = действительная толщина образца / кажущаяся толщина образца [4].

Прозрачность и мутность (ASTM D1003). Прозрачность определяется как отношение интенсивности света, прошедшего через образец, к интенсивности падающего светового потока. Этот показатель обычно выражают в процентах от падающего света. Так, например, ПММА пропускает 92% падающего нормально к образцу светового потока. Около 4% нормально падающего светового луча преломляется на границе полимер-воздух.

Мутность – это внешний вид прозрачного образца, напоминающий облачность. Это явление обусловлено светорассеянием внутри полимера или от его поверхности. Мутность определяется как доля светового потока, проходящего через образец, которая отклоняется от направления луча вследствие обратного рассеяния. Обычно принимают, что если интенсивность прошедшего света более чем на 2,5° отклоняется от интенсивности падающего луча, то соответствующий образец рассматривается как мутный. Обычно мутность бывает обусловлена поверхностными дефектами, вариациями плотности или включениями, вызывающими рассеяние света. Величину мутности также оценивают в процентах.

Светопропускание и мутность с практической точки зрения представляют собой исключительно важные характеристики материала. Так, например, материал, используемый для покрытий оконных стекол, должен иметь очень высокую прозрачность и мутность должна отсутствовать. Напротив, материалы, используемые для изготовления корпусов световой аппаратуры, должны в максимальной степени рассеивать свет и быть минимально прозрачными, чтобы исключить прямые лучи от ярких источников света. Однако такой материал должен обладать высоким светопропусканием.

Процедура испытаний: Для проведения испытаний необходимо иметь интегрирующий сферический измеритель мутности (рисунки 3 и 4). Испытуемый образец должен быть достаточно большим, чтобы перекрыть апертуру, но при этом не слишком большим, чтобы он мог располагаться по касательной к сферической части прибора. Наиболее часто для этой цели используют диск диаметром 2 дюйма. Процедура измерений состоит в получении четырех последовательных показаний, измеряемых с помощью фотодатчика, а именно: T_1 – образец и ловушка для света установлены вне позиции для измерений, стандарт преломления

установлен в позиции для измерений; T_2 – образец и стандарт установлены в позиции для измерений, ловушка для света находится вне позиции для измерений; T_3 – ловушка для света установлена в позиции для измерений, образец и стандарт находятся вне позиции для измерений; T_4 – образец и ловушка для света установлены в позиции для измерений, стандарт находится вне позиции для измерений [4].

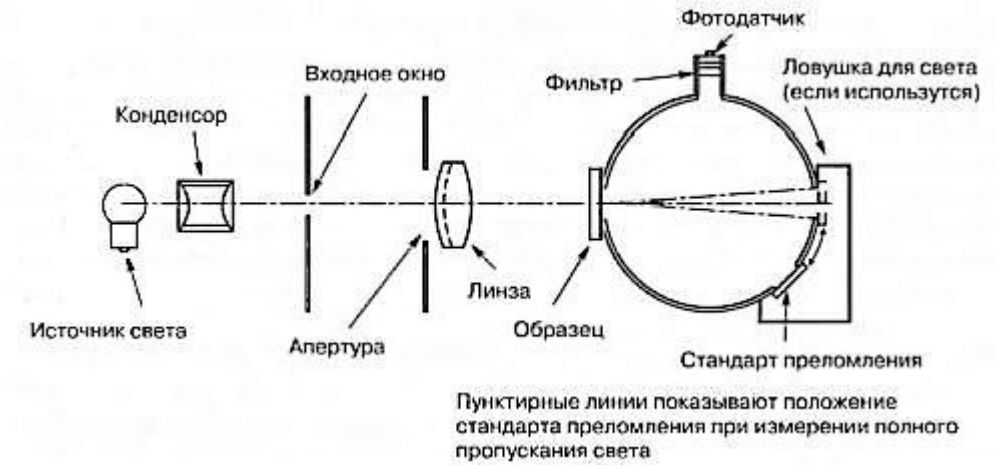


Рисунок 3. – Схема прибора для измерения мутности [5]

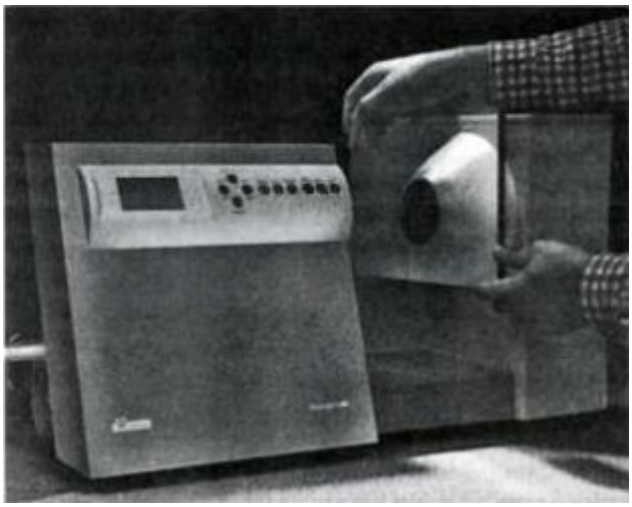


Рисунок 4. – Прибор для измерения мутности [5]

Мутность вызывается рассеянием света в материале и может быть следствием влияния молекулярной структуры, степени кристаллизации либо посторонних включений на поверхности или внутри образца полимера. Мутность свойственна только полупрозрачным или прозрачным материалам и не относится к непрозрачным материалам. Мутность иногда считают противоположностью к глянцу, который собственно может быть поглощением падающего пучка света. Однако согласно методу испытания на мутность, фактически измеряют

поглощение, пропускание и отклонение луча света полупрозрачным материалом. Образец помещают на пути узкого пучка света таким образом, что часть света проходит через образец, а другая часть не встречает препятствия. Обе части пучка проходят в сферу, оснащенную фотодетектером. Можно определить две величины: общую интенсивность пучка света; количество света, отклоненного более чем на 2,5° от исходного пучка. По этим двум величинам можно вычислить следующие два значения: мутности, или процента подающего света, рассеянного более чем на 2,5°, коэффициента светопропускания, или процента падающего света, который пропускается через образец [3].

Величины, получаемые в каждой серии измерений - это интенсивность падающего света, общий световой поток, прошедший через образец, светорассеяние, обусловленное прибором, и светорассеяние, обусловленное прибором и образом.

Общее светопропускание T_t, диффузное светопропускание T_d и мутность рассчитывают по формулам соответственно [4]:

$$T_t = T_2 / T_1 ; \quad (1)$$

$$T_d = [T_4 – T_3 \cdot (T_2 / T_1)] / T_1 ; \quad (2)$$

$$\text{Мутность} = (T_d / T_t) \cdot 100\% , \quad (3)$$

Фотоупругие свойства. Динамооптическая чувствительность. Если рассматривать многие полимеры, находящиеся под действием внутренних или внешних напряжений, в поляризованном свете, то они обнаруживают отчетливо выраженные динамооптические свойства. Световые волны в плоскости, в которой созданы деформации, распространяются с иной скоростью, нежели в перпендикулярном направлении. Различие в скоростях распространения световых волн в различных направлениях называют двулучепреломлением. Под оптической чувствительностью к действию напряжений понимают способность некоторых материалов к проявлению различного преломления (двулучепреломлению), если материал находится под действием напряжений.

Для того чтобы создать плоскую поляризацию некогерентного света используют поляризационные линзы. Когда две такие поляризованные среды находятся под углом друг к другу, возникает оптический эффект вращения или же появляется двойное лучепреломление (рисунок 5).

При производстве линз и других прозрачных деталей метод фотоупругости может использоваться для контроля качества. Это метод представляет собой способ неразрушающего контроля, который позволяет оценить условия разрушения деталей путем отливки не-

скольких образцов из прозрачных пластмасс и исследовании концентрации напряжений в этих образцах [5].

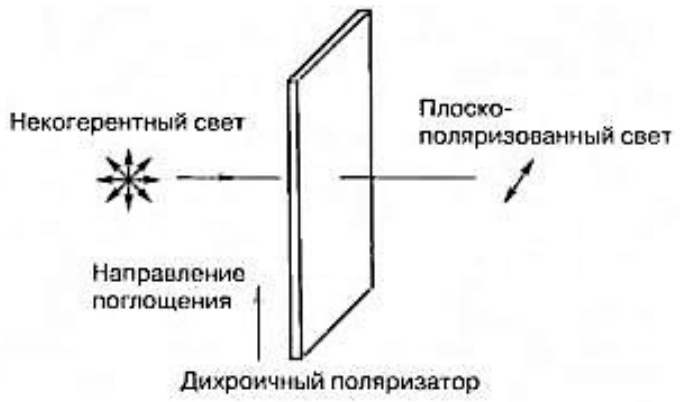


Рисунок 5. – Создание плоскополяризованного света [5]

Для определения зависимости оптического эффекта от напряжения используется довольно простая установка, схема которой показана на рисунке 6.

Эксперимент состоит в том, что исследуемый образец помещается между двумя поляризующими средами. Наблюдение за этим образцом происходит со стороны, противоположной источнику освещения. Поляризованный свет характеризуется числом полос или колец, которое является мерой действующих напряжений. Если в качестве источника освещения используется белый свет, то картина поляризации представляет собой красивый набор полос всех цветов спектра. Но дли количественного исследования распределения напряжений предпочтительнее использовать монохроматический свет, что позволяет получать более точные результаты [5].

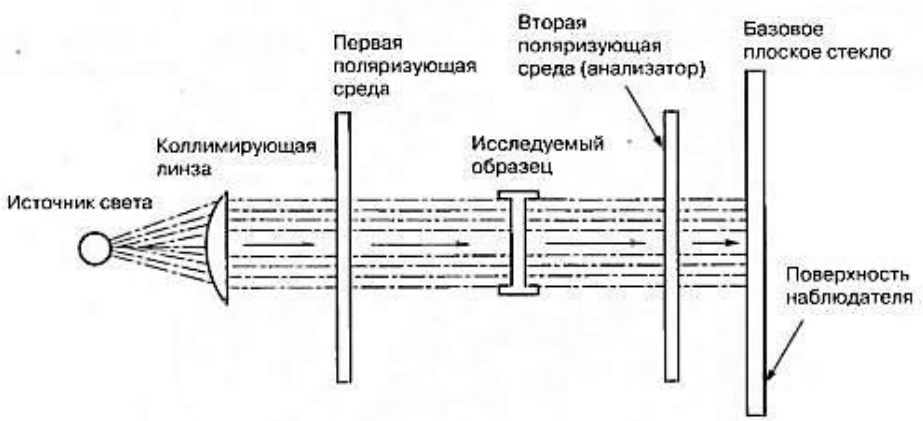


Рисунок 6. – Схема установки, используемой для оценки фотоупругих свойств материала [5]

На рисунке 7 показан предлагаемый на рынке прибор для исследования явления фотоупругости.

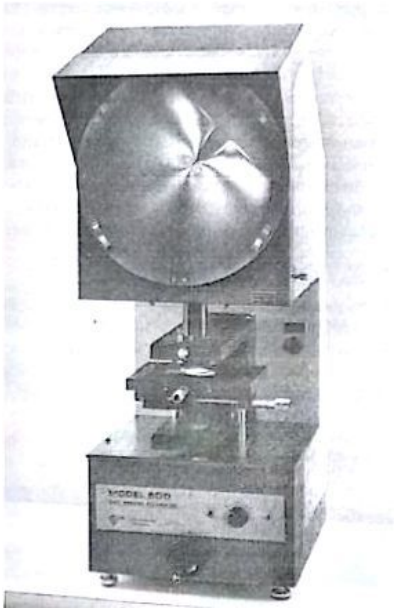


Рисунок 7. – Полярископ для исследования двух-
и трехмерных фотоупругих моделей [5]

Окраска. Восприятие цвета требует участие трех компонент - источника света, объекта и наблюдателя. Процесс состоит в следующем. Световой поток достигает поверхности образца. Далее часть светового потока отражается от поверхности. Угол этого зеркального или полного отражения равен углу, под которым пучок света падает на поверхность образца, но распространяется в противоположном направлении. В отраженном свете содержатся все компоненты цветовой гаммы, которые присутствовали в падающем пучке света. Поэтому если объект освещался белым светом, то и отраженный свет будет белым.

Часть падающего света попадает внутрь образца, где он модулируется благодаря селективной адсорбции, отражается и рассеивается красителем, полимером и различными добавками. Селективная адсорбция и отражение различных длин волн создают цвет. Так, например, если объект поглощает все цвета спектра из падающего белого света, кроме голубого, то голубая компонента остается немодифицированной и отражается или проходит через образец. Наблюдатель видит эту голубую составляющую прошедшего или отраженного света и говорит, что исследуемый объект – голубой [4].

Цветовая гамма меняется в пределах от темного до светлого цвета. Самый темный - это черный цвет, серый занимает промежуточное положение, а самый светлый - это белый цвет. Эти цвета называют нейтральными. Цвет характеризуют «величиной», или «яркостью».

Другая классификация основана на длинах волн: цвет может быть красным, синим, зеленым или желтым. При такой классификации используется термин «оттенок цвета». Именно оттенки цветовой гаммы позволяет определить окраску объекта, называя ее красной, желтой, зеленой, синей, пурпурной или же промежуточной между двумя различными цветами. Кроме того, используют такой термин, как «насыщенность» цвета или его «шкала», который выражает степень отклонения данного цвета от серого при одинаковой яркости [4].

Методика работы с современным фотоколориметром (рисунки 8 и 9) очень проста. Прежде всего, прибор калибруют, используя имеющиеся стандарты. Далее выбирают способ освещения. Плоский окрашенный образец устанавливают в держателе и направляют на него свет от источника. На дисплее немедленно появляются значения интенсивности отражения во всей видимой части спектра с интервалом в 20 нм. Встроенный микропроцессор сразу же дает значения показателей цвета и представляет график спектральной интенсивности в функции длины волны света. Подбор цвета исследуемого материала осуществляется путем сопоставления его спектра со спектром стандартного образца [5].

Рисунок 8. – Схема работы колориметра и спектрофотометра [5]

Рисунок 9. – Колориметр (слева) и спектрофотометр (справа) [5]

В последние годы появилось новое поколение колориметров, основанных на использовании спектрофотометров (рисунки 8 и 9). В этих приборах не моделируется человеческий глаз. Вместо этого проводятся измерения интенсивности светового потока в 16 точках по длине волн с интервалом в 20 нм, что позволяет перекрыть всю область видимого света. Доля отраженного света, полученного спектрофотометром, с помощью встроенного микропроцессора преобразуется в три основные характеристики окраски. Еще одним достоинством таких спектрофотометров является возможность выбора различных типов освещенности. Спектрофотометр дает полную развертку спектра в области длин волн от 380 до 700 нм. Кроме того, эти приборы дают оценку отражения на различных длинах волн с интервалом 20 нм и позволяют рассчитать трехмерные координаты окраски и сравнить различные цвета [5].

Визуальная оценка цвета (ASTM D1729). Два объекта одного и того же цвета могут не различаться, если они рассматриваются при освещении одного типа (например, при дневном свете), но их цвет кажется различным, если используется иное освещение (например, свет ламп накаливания). Это явление известно под названием метамерия. Под этим названием имеют в виду явление несовпадения относительной окраски сопоставляемых образцов при изменении типа освещения или наблюдателя.

В целях упрощения визуальной оценки окраски и минимизации изменений, обусловленных различием в способах освещения образцов, был предложен стандартный метод определения различий цвета (рисунок 10). Согласно этому методу испытаний определяются спектральные характеристики источника света. Для визуальной оценки цвета используют три различных типа источника света. За условия дневного освещения принимают спектральный состав света дневного северного неба с умеренной облачностью. В качестве освещенности в условиях закрытого помещения принимают свет лампы накаливания с температурой раскаленной нити в 2854 К. И в качестве флуоресцентного освещения принимают свет дневной лампы с температурой 4400 К. Фон интерьера помещения для визуального контроля цвета образован нейтральным серым цветом. Образец рассматривается в специально оговоренных условиях освещенности и сравнивается со стандартом. Результатом испытаний является оценка отклонения цвета от стандарта, оцениваемая по яркости, насыщенности и окраске с указанием на то, в каком порядке необходимо вносит коррекции [4].

Рисунок 10. – Лабораторная установка для визуальной оценки цвета [5]

Отражательная способность (ASTM D2457, D523). Под отражательной способностью понимается возможность поверхности образца отражать, как зеркало, падающий на него поток света. Соответствующий метод разработан с целью сопоставить результаты инструментальных измерений с блеском поверхности, наблюдаемым визуально по отражению света при соответствующих углах. Пучок света направляется на образец под некоторым углом, а отраженный свет собирается и измеряется его интенсивность. Все стандарты, согласно которым оценивается отражательная способность поверхности, основываются, прежде всего, на сопоставлении отражения от поверхности испытуемого образца с отражением от хорошо отполированной черной поверхности, отражательная способность которой принимается за 100 [5].

В основном используются три значения углов падения света - 20°, 60° и 80°. При увеличении угла падения света показатель отражательной способности возрастает. Прибор для измерения отражения (рисунки 11 и 12) состоит из источника света и оптической системы. В качестве источника используется свет лампы накаливания. Оптическая система включает фокусирующую линзу и систему сбора отраженного света. Луч света от источника направляется на образец. Чувствительный фотодетектор собирает отраженный свет и преобразует его в электрический сигнала, который через усилитель попадает на аналоговый или цифровой датчик. Измеренный сигнал преобразуется в единицы отражательной способности («единицы блеска»).

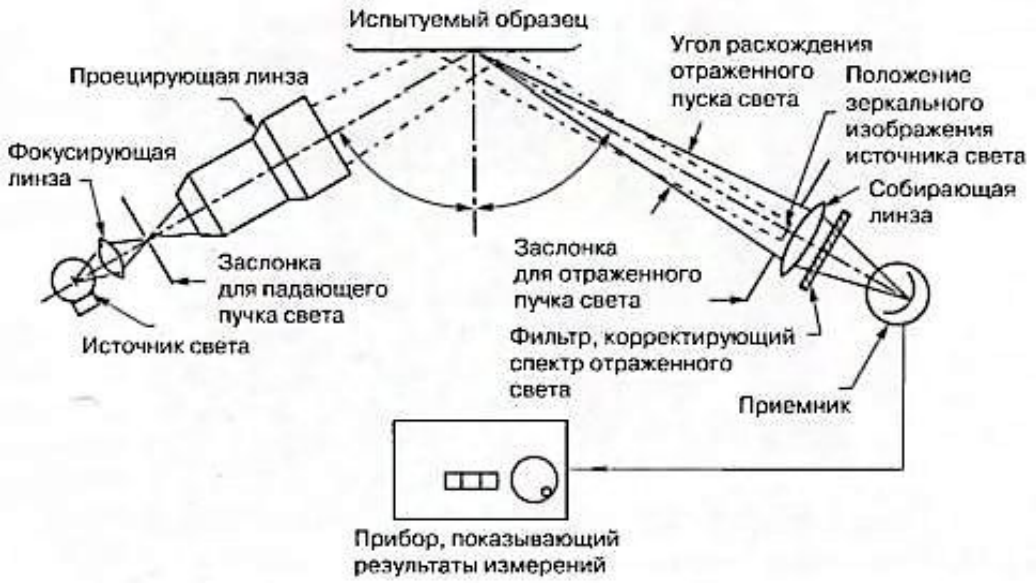


Рисунок 11. – Схема прибора для измерения отражательной способности поверхности образца [5]

Методика измерения интенсивности отражения очень проста. Прибор включается, и проводятся измерения отражательной способности черного стандарта. Шкала с помощью регулятора устанавливается таким образом, чтобы получить значение, отвечающее этому стандарту. Затем датчик помещается на поверхность исследуемого образца, и величина отражения считывается непосредственно со шкалы аналогового или числового прибора. Линейность шкалы прибора грубо контролируется путем измерения блеска другого - белого - стандарта, который должен давать значение отражательной способности, не выходящего за пределы 1 единицы по отношению к принятой величине отражения этого стандарта [5].

Рисунок 12. – Прибор для измерения отражательной способности поверхности [5]

Глянец (DIN 67530, ASTM D523). Глянец связан со способностью поверхности отражать больше света в некотором направлении по сравнению с другими направлениями. Глянец можно измерить с помощью глянцемера. Яркий свет отражается от образца под углом, а яркость отраженного света измеряют фотодетектором. Наиболее часто используют угол 60° (рисунок 13). Более блестящие материалы можно измерять под углом 20°, а матовые поверхности - под углом 85°. Глянцемер (рисунок 14) калибруют при помощи эталона из черного стекла, имеющего значение глянца 100. Пластики имеют меньшие значения – они строго зависят от способа формования [3].

Рисунок 13. – Метод измерения глянца [2]

Рисунок 14. – Прибор для измерения глянца [2]

Таким образом, многие виды пластических масс по праву носят название органических стекол. Они обладают комплексом оптических и механических свойств, который делает их исключительно ценным материалом как для оптической промышленности, так и для аппарато- и машиностроения.

Органические стекла отличаются высокой прозрачностью и бесцветностью, но могут легко быть окрашены минеральными и органическими красителями; они пропускают лу-

чи света в широком диапазоне волн, в частности, ультрафиолетовую часть спектра, причем в этом отношении превосходят в десятки раз обычные стекла. Наряду с высокими оптическими свойствами органические стекла отличаются также высокой прочностью и способностью к формованию.

Полимерные оптические материалы находят широкое применение в различных областях науки и техники. Непрерывно возрастает использование полимеров как заменителей традиционных для оптики материалов – стекла и кристаллов. Это обусловлено ценными для многих назначений физико-механическими свойствами полимеров, а также сравнительной простотой изготовления деталей из них. Полимерные материалы оказываются также перспективными для целого ряда новых научно-технических направлений. В одних случаях определяющую роль играют специфические оптические свойства полимеров (поляроиды, фотополимеризуемые материалы для голографии и т. п.), в других – важна способность полимеров легко совмещаться с разнообразными веществами, которые обладают ценными оптическими свойствами, но не могут быть использованы самостоятельно по комплексу физико-механических свойств (фотохромные полимеры на основе органических фотохромных веществ, полимерные активные волокна, в том числе лазер на волокне, и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии [Текст]: книга для вузов. / Б.В. Иоффе. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Л.: Химия, 1983 – 352 с.: ил. – 8 000 экз.
2. Международные (зарубежные) методы испытаний полимерных материалов. Часть 3 [Электронный ресурс]: статья. – Электрон. дан. – М.: Компания DPK-deck, 2017. – Режим доступа: http://www.dpk-deck.ru/page/metodi-ispitanij-3.html, свободный. – Загл. с экрана.
3. Методы испытаний полимерных материалов [Электронный ресурс]: статья. – Электрон. дан. – М.: ООО КОМЕФ, 2007. – Режим доступа: http://www.komef.ru/metodisppolimer.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
4. Оптические свойства полимеров [Электронный ресурс]: статья. – Электрон. дан. – М.: Компания «ЮДжиЭнЛаб Испытательное оборудование», 2007. – Режим доступа: http://ugnlab.ru/content/view/1186/187/, свободный. – Загл. с экрана.
5. Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения [Текст]: справочное руководство для химико-техн. спец. / Перевод с английского 3-го издания / Под ред. А.Я. Малкина / В. Шах. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009 – 732 с.: ил. – ISBN 978-5-91703-005-0. – 900 экз.