

показатель преломления значением 1,62. При переходе к фториднофосфатным стеклам коэффициент дисперсии стекол удается увеличить до 78—80, а в исключительных случаях — до 100. Введение фторидов придает стеклам также особый ход относительных частных дисперсий (стекла типа ОК) [15].

1.3. Система нормируемых параметров, определяющих показатели качества оптического стекла

Оптическое бесцветное стекло нормируется по следующим параметрам: показателю преломления, средней дисперсии, однородности партии заготовок по показателю преломления, однородности партий заготовок по средней дисперсии, оптической однородности, двойному лучепреломлению, радиационно-оптической устойчивости для стекол серии 100, показателю ослабления, бесцветности, пузырькости.

В качестве основного показателя преломления стекла ранее использовался показатель преломления в желтой части спектра (т. е. для линий D или d). Это связано с высокой чувствительностью человеческого глаза в желтой части спектра, а также с тем историческим обстоятельством, что первоначально в оплотехнике подавляющее большинство приборов было рассчитано для работы с глазом наблюдателя. Однако линия D не очень удобна, так как представляет собой слабо расщепленный дублет. Линия e также расположена вблизи максимума чувствительности глаза человека, но более приемлема для измерения. Кроме того, в широко развитой сейчас проекционной фотолитографии именно при использовании линии e производится важная технологическая операция совмещения (длина волны 546 нм неактивна по отношению к фоточувствительному слою).

В качестве средней дисперсии принята величина $n_{F'} - n_{C'}$, вместо прежней $n_F - n_C$. Таким образом, коэффициент средней дисперсии

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}$$

вместо

$$v_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

Относительные частные дисперсии $\frac{n_1 - n_2}{n_{F'} - n_{C'}}$ для отечественных стекол рассчитаны для 24 участков спектра, начиная от $n_{312,6}$ — $n_{334,1}$ и кончая $n_{2249,3}$ — $n_{2325,4}$.

По отклонению показателя преломления установлено пять категорий (табл. 1.2), по отклонению средней дисперсии — также пять категорий (табл. 1.3).

Таблица 1.2. Категории стекла по отклонению показателя преломления

Категория стекла	Предельное отклонение $n_e \cdot 10^4$
1	± 2
2	± 3
3	± 5
4	± 10
5	± 20

Таблица 1.3. Категории стекла по отклонению средней дисперсии

Категория стекла	Предельное отклонение $(n_{F'} - n_{C'}) \cdot 10^6$
1	± 2
2	± 3
3	± 5
4	± 10
5	± 20

Ряд оптических стекол при отжиге испытывает такие структурные превращения, которые влекут за собой изменение средней дисперсии. Это относится к маркам ЛФ9, ЛФ10, ТФ2, ТФ3, ТФ4, ТФ104, ТФ5, ТФ105, ТФ7, ТФ8, ТФ108, ТФ10, ТФ110. Получение их по первой категории средней дисперсии затруднено.

Под однородностью партии по показателю преломления и дисперсии понимается одинаковость их значений у всех заготовок партии. По однородности партий заготовок по показателю преломления n_e установлено четыре класса (табл. 1.4), по однородности по средней дисперсии — два класса. Класс В соответствует наибольшей разности $1 \cdot 10^{-4}$ средних дисперсий в партии заготовок, класс Г — пределу отклонений для заданной категории по табл. 1.3.

Проще всего высшие классы однородности получают при комплектировании партии из стекла одной варки. Однако ряд новых стекол с ценными оптическими постоянными не может быть сварен в сосуде такого объема, который позволил бы комплектовать крупную партию заготовок. Поэтому ГОСТ 3514—76 устанавливает, что любой класс однородности можно требовать при заказе партии стекла массой не более 120 кг.

Оптическую однородность наиболее просто представить себе как абсолютное постоянство показателя преломления в любой точке объема стекла. Однородность — основное свойство оптического стекла, отличающее его от стекла любого иного назначения. Однако даже в оптическом стекле однородность нарушается свиями, напряжениями и структурной неоднородностью. Поэтому необходимо определить ту степень однородности, которая обеспечит прибору нужное оптическое качество. Однородность можно охарактеризовать, измеряя разность показателей преломления в различных точках. Но выполнить такие измерения можно лишь с помощью сложной интерферометрической методики, что непригодно для массового контроля. Поэтому используют косвенные методы, оценивающие однородность стекла.

Для заготовок диаметром до 250 мм установлено пять категорий оптической однородности, которые определяют по изменению разрешающей способности коллиматорной установки при введении в параллельный пучок лучей контролируемой заготовки. Отношение угла разрешения установки с образцом к углу разрешения установки без образца должно быть для 1 и 2-й категорий равно 1, для 3-й — 1,1, для 4-й — 1,2, для 5-й — 1,5. Отличие 1-й категории от 2-й заключается в том, что при максимально высоких требованиях к оптической однородности проверяют качество дифракционного изображения точечной миры, которое должно иметь вид круглого пятна с кольцами без разрывов и хвостов.

Для заготовок диаметром более 250 мм также установлено пять категорий оптической однородности. Каждая категория характеризуется тремя коэффициентами, которые учитывают: неоднородность показателя преломления, возникшую в процессе отжига, несимметричность неоднородности показателя преломления относительно оптической оси, возникающую также в процессе отжига, и неоднородность стекломассы.

При охлаждении стекла ниже температур отжига в нем появляются механические напряжения из-за перепадов температуры между внутренними и внешними частями заготовки. Значение напряжений зависит от скорости охлаждения, размеров заготовки и в некоторой степени от термических и механических свойств стекла. Механически напряженное состояние стекла вызывает в нем соответствующее двойное лучепреломление. Связь между двойным лучепреломлением, выраженным в изменении показателя преломления Δn , и механическими напряжениями $\Delta \sigma$ устанавливается при помощи оптического коэффициента напряжения B (ОКН)

$$\Delta n = B \Delta \sigma = \delta/s,$$

где δ — разность хода, возникающая при прохождении поляризованного света через напряженный образец, нм; s — толщина образца, см.

Большинство стекол имеет положительное значение ОКН (если напряжения при растяжении, как принято в теории упругости, считать с положительным знаком) в пределах $(2 \div 3,5) \cdot 10^{-12}$ Па.

Таблица 1.4. Классы стекла по однородности партий заготовок

Класс стекла	Наибольшая разность $n_{e1} - n_{e2}$ в партии заготовок
А	$0,2 \cdot 10^{-4}$
Б	$0,5 \cdot 10^{-4}$
В	$1 \cdot 10^{-4}$
Г	В пределах отклонений для заданной категории по табл. 1.3

Измерение двойного лучепреломления в нашей стране ведется в направлении наибольшего размера заготовки, у большинства иностранных фирм — в рабочем направлении заготовки. Установлено пять категорий двойного лучепреломления. Как видно из табл. 1.5, при этом учитывается значение ОКН.

Полное отсутствие напряжений в крупногабаритных заготовках также может вызвать нежелательные эффекты, так как в этом случае сильно проявляется воздействие собственной массы и любых внешних нагрузок, например, при закреплении детали.

Светопоглощение оптического стекла ранее определялось через так называемый коэффициент светопоглощения K_A , т. е. через выраженное в процентах отношение потока белого света (излучение газополной лампы, близкое к излучению стандартного источника света A), поглощенного стеклом толщиной 1 см, к световому потоку в начале пути. В действительности в данном случае кроме потерь на поглощение учитываются потери на рассеяние света, поэтому суммарную величину правильнее и точнее называть коэффициентом ослабления. Допускавшаяся неточность объясняется тем, что потери на рассеяние находятся в диапазоне 0,002—0,080 на 1 см и ими можно было пренебрегать. Сейчас в связи со все более широким использованием сверхпрозрачных стекол со светопоглощением 0,1 % и менее потери на светорассеяние часто становятся сравнимыми с потерями на светопоглощение.

Таблица 1.5. Категории стекла по двойному лучепреломлению

Категория	Двойное лучепреломление (нм/см), не более, для $B \cdot 10^{12}$ Па		
	до 2	2—2,8	св. 2,8
1	1,5	2	3
2	4	6	8
3	7	10	13
4	10	15	20
5	35	50	65

Причинами светорассеяния могут быть технологические пороки (мелкие пузырьки, начало выделения кристаллической фазы из стекла, мелкие посторонние включения), но основной причиной являются флуктуационные изменения плотности в микрообъемах стекла, связанные с особенностями стеклообразного состояния — наличием в большинстве стекол микроликвационной структуры и явлениями сегрегации отдельных видов ионов в стекле.

Отчетственные стекла характеризуются значением показателя светорассеяния σ' (% см^{-1}) для длины волны 546 нм (σ' — величина, обратная длине пути света в стекле, на которой вошедший световой поток за счет рассеяния уменьшается в e раз, где e — основание натурального логарифма).

Ряд марок стекол, варящихся в платиновых тиглях, чрезвычайно агрессивно действует на платину при высоких температурах, растворяя в своем расплаве некоторое ее количество. При понижении температуры расплава, необходимом для отлива стекла, растворимость платины в стекле уменьшается и она выделяется в виде мелких кристаллов с размерами 0,5—1 мкм, увеличивая светорассеяние.

Светопоглощение стекла нормируется по показателю ослабления ϵ_A . Он представляет собой величину, обратную расстоянию, на котором поток излучения от стандартного источника A ослабляется в результате поглощения и рассеяния в стекле в 10 раз. Светопоглощение стекла неравномерно по спектру: поглощение в ультрафиолетовой и синей частях спектра во много раз больше, чем в желтой и красной. Это может вести к искажению правильной цветопередачи в сложных многолинзовых кино- и телеобъективах. Поэтому сейчас указывают длины волн, при которых коэффициенты пропускания в толщине стекла 10 мм равны 0,50 и 0,90.

Практика отчетственного стекловарения последних лет показывает, что стабильно производятся с малым светопоглощением и с правильной цветопередачей 26 марок стекол: ЛК6, К8, БК10, ТК14, ТК16, СТК3, СТК7, СТК8, СТК12, СТК9, БФ25, Ф1, ТФ1, ТФ3, ТФ4, ТФ5, ТФ7, ТФ8, ОФ4, ОФ5, ОФ6, ТБФ10, ТВФ9, ТФ13, ФК11, ФК14. Для значений показателя ослабления ϵ_A установлено восемь категорий (табл. 1.6). При выборе категории для заказа стекла следует учитывать, что малое светопоглощение достигается в основном за счет использования особо чистых химических реактивов и специальных огнеупоров, что предопределяет большую

стоимость стекла высших категорий. Поэтому такое стекло рекомендуется использовать в волоконной оптике, в элементах лазеров, в кино-, фото- и телеобъективах, предназначенных для цветных съемок, в многолинзовых системах с общей длиной пути света в стекле приблизительно 200 мм.

Свилью в оптическом стекле принято называть стеклообразные прозрачные включения, отличающиеся по показателю преломления от окружающего их стекла. Эта разница в показателе преломления есть следствие иного химического состава свили по сравнению с окружающей массой стекла. В стекле могут встречаться как одиночные свили, так и потоки свилей. Одиночная свиль мало влияет на качество изображения, так как оптические приборы обычно работают в широких пучках и одиночная свиль отклоняет от расчетного направления пренебрежимо малую часть светового потока. Потоки свилей по своему оптическому действию близки к плавной химической неоднородности в стекле. Они могут существенно снизить разрешающую способность оптической системы и даже вызвать появление астигматической aberrации. Нормирование бессвильности тесно связано с методом ее контроля. При просмотре на эталонированной теневой установке с точечным источником света стекло относится к 1-й или 2-й категориям бессвильности соответственно. Кроме категорий существуют два класса бессвильности. По классу А стекло проверяется на бессвильность в двух взаимно перпендикулярных направлениях, по классу Б — в одном направлении. Направление контроля указывает заказчик. По классу А обычно заказывается стекло для призмной оптики, по классу Б — для линзовой. Заготовки диаметром до 250 мм подвергаются выборочному 10 %-му контролю, заготовки размером более 250 мм — сплошному контролю.

Таблица 1.6. Категории стекла по показателю ослабления света

Категория ослабления	ϵ_A , см^{-1}
1	0,0002—0,0004
2	0,0005—0,0009
3	0,0010—0,0017
4	0,0018—0,0025
5	0,0026—0,0035
6	0,0036—0,0045
7	0,0046—0,0065
8	0,0066—0,0130

Таблица 1.7. Категории пухырности оптического стекла

Категория пухырности	Диаметр наибольшего пухыря в заготовке, мм	Категория пухырности	Диаметр наибольшего пухыря в заготовке, мм
1	0,002	6	0,7
1а	0,05	7	1,0
2	0,1	8	2,0
3	0,2	9	3,0
4	0,3	10	5,0
5	0,5		

В связи со сложностью физико-химических процессов, происходящих в расплавленной стекломассе на различных стадиях технологического процесса, в затвердевшем стекле, как правило, остается определенное количество газовых включений — пухырей [3]. В СССР принято пухырность оптического стекла характеризовать двумя параметрами: диаметром наибольшего пухыря в заготовке стекла и суммарным числом всех пухырей в 1 кг сырьевого стекла. К пухырям приравниваются и непрозрачные включения — каменистые включения, отдельные кристаллы и т. п. ГОСТ 3514—76 устанавливает 11 категорий пухырности (табл. 1.7) и предусматривает зависимость категории пухырности от массы заготовки. Контроль категорий пухырности для заготовок размером до 50 мм ведется выборочно (10 % от партии), заготовки большего размера подвергаются сплошному контролю.

Классы пухырности сырьевого оптического стекла (табл. 1.8) в ГОСТ 3514—76 помещены в обязательном приложении. Подсчет числа пухырей для определения класса пухырности начинается с размера 0,03 мм. Все иностранные оптические фирмы характеризуют пухырность стекла при помощи суммарного параметра, подчитываемая площадь сечения (мм²) всех пухырей, заключенных в 100 см³ стекла. Эта же система принята для «Совместного каталога оптического стекла СССР—ГДР»

(табл. 1.9). По отношению к блочному стеклу указанные группы пузырьрности являются гарантированными.

Пузырность стекла связана с его химическим составом и технологией производства. Наименее пузырьными стеклами являются некоторые кроны, флинты и тяжелые флинты, наиболее пузырьными — тяжелые кроны и некоторые сверхтяжелые кроны, несмотря на то, что все СТК варятся только в беспористых платиновых сосудах. Тяжелые кроны и баритовые флинты могут вариться как в керамических, так и в платиновых сосудах, в последнем случае класс пузырьрности ТК и БФ существенно улучшается. Наименее пузырьное стекло необходимо для изготовления сеток и шкал и для окулярных линз, ближайших к фокальной плоскости. Приходится считать и с тем обстоятельством, что наличие видимых пузырей в передних линзах любительских фотообъективов для покупателя является браковочным признаком. Для технолога-обработчика класс пузырьрности сырьевого стекла имеет определенное значение, так как в многопузырном стекле увеличивается вероятность образования вскрывших пузырей на полированной поверхности деталей.

Таблица 1.8. Классы пузырьрности оптического стекла

Класс пузырьрности	Число пузырей в 1 кг, не более
А	3
Б	10
В	30
Г	100
Д	300
Е	1000
Ж	3000

Таблица 1.9. Группы пузырьрности оптического стекла

Группа пузырьрности	Суммарная площадь сечений пузырей в 100 см ² стекла, мм ²
1	Менее 0,032
2	0,032—0,125
3	0,125—0,250
4	0,25—0,50
5	0,5—1,0
6	1,0—2,0
7	2,0—4,0

Для стекла серии 100 дополнительно предусмотрено нормирование радиационно-оптической устойчивости, характеризуемой приращением оптической плотности ΔD на 1 см после облучения стекла от источника излучения ⁶⁰Co дозой 25,8 Кл/кг при средней мощности дозы 1 (Кл/кг)/с. Стекло должно соответствовать требованиям табл. 1.10.

Таблица 1.10. Приращение оптической плотности после радиационного облучения стекла

Марка стекла	ΔD , не более	Марка стекла	ΔD , не более	Марка стекла	ΔD , не более	Марка стекла	ΔD , не более
ЛК103	0,040	БК108	0,020	БФ111	0,060	Ф113	0,070
ЛК105	0,050	БК110	0,040	БФ112	0,045	ТФ101	0,080
К108	0,015	ТК102	0,025	БФ113	0,200	ТФ103	0,040
К100	0,030	ТК104	0,025	БФ121	0,120	ТФ104	0,045
К114	0,045	ТК114	0,025	ЛФ105	0,110	ТФ105	0,040
К119	0,025	ТК116	0,025	Ф101	0,070	ТФ108	0,080
БК104	0,015	ТК120	0,020	Ф102	0,070	ТФ110	0,040
БК106	0,015	ТК121	0,065	Ф104	0,070	ОФ101	0,050

1.4. Условия и формы поставки оптического стекла

ГОСТ 3514—76 действителен для всех заготовок с наибольшим размером до 500 мм, однако не из всех марок стекол можно изготовить качественные заготовки такого размера вследствие неудовлетворительных технологических свойств этих стекол. Во избежание недоразумений следует знать, что для 15 марок гостированных

стекол существуют ограничения наибольшей массы заготовок, которые могут быть изготовлены в соответствии с требованиями ГОСТа (табл. 1.11).

Оптическое стекло поставляется либо в форме блочного стекла с установленными при заказе размерами или с произвольными размерами, либо в виде заготовок с размерами по заказу потребителя. Основными видами заготовок являются прессовки, круглые шайбы и призмы. Относительно редкими видами поставок являются заготовки-капли (например, заготовки микрооптики из сильно кристаллизующихся стекол) и цилиндрические штабики.

Прессовки — это заготовки для линз и призм, изготовленные горячим прессованием и имеющие естественную поверхность после прессования или шлифованные. Круглые шайбы представляют собой цилиндрические заготовки с матовой боковой поверхностью и матовыми или просветленными торцевыми поверхностями. Призмы — заготовки с плоскими поверхностями, которые обработаны путем распиливания, шлифования, грубого полирования или имеют естественный после прессования вид.

Блочное стекло поставляется:

1) в виде полированных с двух сторон прямоугольных блоков шириной и длиной в пределах 150—500 мм и толщиной 20—60 мм, у которых четыре боковые стороны не обрабатываются;

2) в виде шлифованных со всех сторон прямоугольных плиток шириной и длиной в пределах 50—150 мм и толщиной 20—60 мм. По особому требованию заказчика шлифованные со всех сторон плитки поставляются мерной толщиной. Отклонения от указанной при заказе толщины не превышают ± 2 мм. Стандартные размеры стекла в плитках: 50×50, толщина 10, 15, 20 мм; 100×100 мм, толщина 10, 20, 30 и 50 мм; 50×150 мм, толщина 20, 30, 40 и 60 мм.

Метод разделки стекла в штабики обеспечивает высокую производительность труда. Штабики выпускаются как кругового (диаметром до 160 мм), так и профильного сечения, например треугольного или прямоугольного с площадью сечения до 400 мм². Форма и размеры сечения штабиков должны быть указаны при заказе стекла.

Прессованные заготовки имеют форму линз, призм, пластинок или дисков и изготавливаются согласно размерам, указанным в чертежах заказчика. При заказе прессованных заготовок должны быть соблюдены следующие условия: диаметр или сторона не менее 8 и не более 150 мм; толщина по оси не менее 3 мм; отношение диаметра к толщине не более 15 : 1; отношение длины прямоугольной заготовки к ее ширине не более 3 : 1; стрелки прогиба сферических поверхностей не менее 0,03 диаметра, при меньших значениях стрелок заготовки выполняются в виде плоских дисков; масса не менее 1,5 г. Допуски для прессованных заготовок в зависимости от диаметра даны в табл. 1.12 в соответствии с «Совместным каталогом оптического стекла СССР—ГДР».

Заготовки для деталей больших размеров поставляются в форме дисков, прямоугольных и квадратных пластин, ограниченных параллельными плоскостями. По особой договоренности заготовки крупных менисков и прямоугольных призм поставляются по чертежам заказчика, согласованным с поставщиком. Допуск на глубину залегания дефектов, в том числе и выколок, находится в пределах 5—8 мм и до 10 мм при диаметре заготовок свыше 1000 мм.

Заготовки, предназначенные для линз и призм различных астрономических приборов, пластин интерферометров и других ответственных изделий больших размеров, изготавливаются из лучшего, тщательно проверенного на свиди стекла, и подвергаются специальному тонкому отжигу, обеспечивающему отсутствие заметных напряжений в стекле и его высокую оптическую однородность. Такие заготовки

Таблица 1.11. Допустимая наибольшая масса заготовок для некоторых марок стекол

Марка стекла	Наибольшая масса заготовок, кг	Марка стекла	Наибольшая масса заготовок, кг
ФК14	1	БФ16	30
ТК17	5	ТБФ4	3
СТК7	30	ЛФ9	1
СТК9	0,5	ЛФ10	1
СТК12	7	Ф9	2
СТК19	8	ТФ10	15
КФ6	3	ТФ110	15
КФ7	3		

Таблица 1.12. Допуски на геометрические размеры прессованных заготовок, мм

Диаметр или наибольшая сторона	Допуск на диаметр или сторону	Допуск на толщину	Просвет по центру сферы при наложении шаблона	Глубина залегания дефектов		Прилипы по краю	Разно-толщина по краю
				по плоскости	по боковой стороне		
20—50	±0,2	+1,0	0,6	0,5	0,5	0,2	0,3
50—90	±0,3	+1,0	0,7	0,5	0,6	0,4	0,4
90—120	±0,3	+1,5	0,8	0,6	0,7	0,4	0,6
120—150	±0,4	+1,5	1,0	0,7	1,0	0,4	0,8
150—200	±0,4	+2,0	1,2	1,0	1,5	—	1,0

поставляют из стекла более чем 30 марок. Заготовки размером до 1 м изготавливаются из стекла марок: Ф1, ТФ1, ТФ5, ТФ105; размером свыше 1 м — из стекла марок: ЛК5, К8, К108, К100.

Для астрономических зеркал поставляют заготовки диаметром до 3 м из стекла марок ЛК5 и ЛК7. Они также подвергаются тонкому отжигу, но не свободны от тонких свилей. Для астродисков диаметром до 6 м использовалось специально разработанное для этой цели стекло. Заготовки для рентгеновских защитных стекол имеют стандартные размеры: 400×400, 400×300, 356×356, 300×40, 240×180 мм и диаметр 30 мм, а для смотровых блоков — 500×500 и 400×300 мм. В стекле заготовок для этих изделий допускаются незначительные свилю, не мешающие наблюдению невооруженным глазом. Заготовки подвергаются обычному тонкому отжигу.

На блоках и заготовках оптического стекла указывается марка стекла и условный номер варки. На прессованных заготовках размером до 20 мм и штабиках дается только марка стекла. Условный номер варки и отжига и размеры заготовки в этом случае приводятся только в паспорте.

Каждая партия стекла сопровождается паспортом, в котором указывается товарный знак изготовителя, марка стекла, условный номер варки и отжига, размеры изделий и их штучная масса, количество изделий в партии и общая масса партии (в случае блочного стекла или стекла в штабиках), показатель преломления n_d , средняя дисперсия, однородность партии по показателю преломления и средней дисперсии, двойное лучепреломление, коэффициент светопоглощения, категория по свилям и размер наибольшего пузыря в стекле, или категория пузырьности.

Все другие сведения о стекле, например характеристика коротковолновой границы пропускания, указываются по особому требованию. Значения оптических постоянных даются в паспорте с точностью, необходимой для гарантии качества, согласованного при заказе.

1.5. Система справочных параметров, определяющих показатели качества оптического стекла

К справочным параметрам относятся следующие характеристики оптических стекол: оптические, термооптические, теплотехнические, электрические, радиационная устойчивость, светорассеяние, механические свойства, химическая устойчивость.

Химическая устойчивость стекол характеризует их сопротивляемость к воздействию факторов, имитирующих действие окружающей среды на полированную поверхность оптической детали. Химическая устойчивость важна при выборе режимов механической и химической обработки поверхности стекла. Для оценки химической устойчивости стекол используются два фактора воздействия: влажная атмосфера и слабодиссоциирующие водные растворы.

Водные растворы могут вызвать на поверхности стекла образование прозрачных или мутных пятен разнообразной формы и окраски. Они возникают в результате

перехода с поверхности стекла в окружающую воду растворимых и гидролизующихся соединений. На поверхности остается высококремнеземистый слой, пронизанный порами диаметром несколько нанометров, который обладает хорошими защитными свойствами, но иными оптическими свойствами, в том числе пониженным показателем преломления (1,45—1,50) и уменьшенным коэффициентом отражения (примерно на 0,5 по сравнению с неизменным стеклом). С пятнами можно встретиться в процессе изготовления оптических деталей из химически малостойких стекол, например ТК, БФ и ТФ. Методика испытания стекол на устойчивость к пятнению дана в ГОСТ 13917—68. Она сводится к установлению времени, за которое свежесполитованная поверхность стекла, лежащего в воде или 0,1 н. растворе уксусной кислоты при температуре 50 °С, приобретает в отраженном свете фиолетовую интерференционную окраску. По этому времени стекла разделены на четыре группы пятнаемости (табл. 1.13).

Некоторые нестойкие силикатные (тяжелые кроны) и несиликатные (боратные, германатные) стекла не образуют пленок с хорошими защитными свойствами, и растворение стекла происходит непрерывно с явно выраженными признаками порчи поверхности. Следует обратить особое внимание на пятнаемость фторфосфатных стекол типа особых кронов, которые относятся к третьей группе пятнаемости. В связи с выявившейся в последнее время тенденцией к применению крупногабаритных линз из этих стекол готовые поверхности таких линз на промежуточных технологических стадиях лучше предохранять защитными покрытиями.

Технологу-обработчику необходимо учитывать, что длительное хранение отполированных деталей без нанесения просветляющих или других покрытий может ухудшать их качество. Межоперационные перерывы для деталей из стекол БФ и ТФ — не более 8 ч, для стекол ТК — не более 1 сут. Защита (эмаль НЦ-25) увеличивает сроки хранения стекол БФ и ТФ до 20 ч.

Устойчивость стекол к действию влажной атмосферы (налетоопасность) связана с явлениями гигроскопичности, т. е. сорбции молекул воды из воздуха некоторыми компонентами стекла, что может привести к образованию на поверхности капельного налета. По устойчивости к действию влажной атмосферы силикатные оптические стекла делятся на группы:

А — стекла, на полированной поверхности которых в условиях 85 %-ной относительной влажности при температуре 50 °С капельно-гигроскопический налет образуется более чем через 20 ч (устойчивые стекла);

Б — стекла, на которых при тех же условиях налет образуется за 5—20 ч (промежуточные стекла);

В — стекла, на которых при тех же условиях налет образуется менее чем за 5 ч (налетоопасные стекла).

Несиликатные оптические стекла по этому показателю разделены на группы: а — стекла, на полированной поверхности которых в условиях 73 %-ной относительной влажности при температуре воздуха 80 °С за 10 ч не появляется признаков разрушения (устойчивые стекла);

у — стекла, на которых при тех же условиях испытания разрушения, видимые на глаз, не обнаруживаются, но они видны при наблюдении в микроскоп с 80× увеличением (удовлетворительные стекла);

д — стекла, на которых при тех же условиях испытания разрушения обнаруживаются невооруженным глазом (неустойчивые стекла).

Гигроскопический налет может возникать уже на деталях готовых приборов, даже если они не контактируют после сборки с воздухом. При проведении испыта-

Таблица 1.13. Группы пятнаемости оптических стекол

Группа пятнаемости	Действующий реагент при 50 °С	Время появления фиолетовой окраски, ч
I (непятнающиеся стекла)	0,1 н. раствор уксусной кислоты	5
		1—5
II (промежуточные)	Вода	1
III (пятнающиеся)		1
IV (нестойкие)		

ний на гигроскопичность стекла СТК, ТБФ, СТФ, ОК оказываются вполне устойчивыми, хотя в их составе нет кремнезема. Это объясняется отсутствием в них и наиболее гигроскопичных компонентов — окислов щелочных металлов.

В реальных условиях эксплуатации, транспортировки и хранения оптические приборы могут подвергаться резким изменениям температуры и влажности, в связи с чем возможна конденсация водяных паров на поверхности оптических деталей. Образование капель воды на поверхностях деталей из несиликатных стекол часто вызывает глубокие разрушения. Такого рода разрушения (помутнение, появление кристаллических образований) проявляются на всех стеклах типов ФК, ОК, СТК, ТБФ и на стеклах марок ОФ3, ОФ4, ОФ5.

Определенное значение имеет для технолога знание коэффициентов термического расширения α стекол (табл. 1.14). При изготовлении точных поверхностей крупногабаритных деталей время, необходимое для «отстаивания» детали, прямо

Т а б л и ц а 1.14. Значения коэффициентов линейного термического расширения оптических стекол

Марка стекла	α в интервале (20÷120) 10 ⁻⁷ , °С	Марка стекла	α в интервале (20÷120) 10 ⁻⁷ , °С	Марка стекла	α в интервале (20÷120) 10 ⁻⁷ , °С
ЛК5	35	ЛФ5	72	БК4	80
ЛК7	44	ТК20	73	БФ27	80
ЛК4	52	БФ1	73	ТФ2	80
СТК10	54	БФ23	73	ТК21	81
ОФ3	55	БФ25	73	БФ8	82
ЛК8	56	ТК7	73	ТФ3	82
СТК9	57	К17	74	ТФ4	82
ТК23	58	БК10	74	ТФ5	82
ТК3	60	БФ4	74	ТФ8	82
КФ7	60	ЛФ7	74	ЛК6	83
ТК1	61	ЛФ11	74	БФ6	83
КФ5	62	Ф1	74	ТФ10	83
ОФ1	63	Ф6	74	К3	84
ТБФ5	64	Ф7	74	БК6	84
БК8	64	Ф13	74	БФ16	84
К1	65	ОФ2	74	ЛФ1	84
К2	65	ТБФ3	75	БФ12	87
ТК12	65	ТБФ4	75	ТФ1	87
ТК4	66	К20	75	ЛФ9	89
КФ1	66	БФ7	75	ЛФ8	90
БФ28	66	Ф1 БС6	75	ФК1	91
СТК12	67	БК9	76	ЛФ12	91
БК11	67	ТК17-75	75	КФ3	91
ТК13	67	К5	76	ЛК3	92
БФ31	68	К8	76	СТК8	92
КФ6	68	КФ8	76	ББК2	93
БФ13	68	БФ19	76	К15	94
БК13	69	Ф2	76	ТФ7	96
ТК8	69	БК12	77	Ф9	97
ТК14	69	ТК9	77	ББК1	99
ТК2	70	БФ21	77	Ф8	101
БФ11	70	ФК3	78	СТФ1	106
БФ26	70	СТК3	79	ФК4	107
К14	71	БФ24	79	ЛК1	113
К18	71	БФ18	79	ОК1	136
КФ4	71	ЛФ10	79		
ТК18	72	К19	80		

зависит от α . Для ряда устройств, например для линейных шкал измерительных микроскопов, необходимо использовать стекла, имеющие то же расширение, что и сопрягаемые с ними металлические детали. Самое же главное заключается в том, что расширением стекла в основном определяется его термостойкость. Известны случаи разрушения крупногабаритных линз при неосторожном их прогреве на стадиях защиты или просветления. Особая внимательность требуется при обращении с фторфосфатными стеклами типа ОК.

Коэффициент α влияет и на термооптические характеристики стекол, так как температурные изменения показателя преломления зависят от смещения края полосы поглощения и от изменения плотности вещества при нагреве.

В документации на оптическое стекло всегда приводятся значения показателей преломления и дисперсий при температуре 20 °С. Оптические приборы, рассчитанные с этими значениями показателей преломления стекол, работают и при других температурах, в том числе и в условиях переменных температурных полей. Это приводит к смещению плоскости изображения (термооптическая абберация положения) и к изменению линейных размеров изображения (термооптическая абберация увеличения), а в переменных температурных полях качество изображения ухудшается из-за искажения фронта световой волны (термоволновая абберация).

Для того чтобы вычислители и конструкторы оптических систем могли вести расчет термооптических и термоволновых аббераций, в отечественных документах ранее, чем это было сделано иностранными фирмами, введена характеристика стекол по термооптическим постоянным $V_{\lambda,t}$ и $W_{\lambda,t}$:

$$V_{\lambda,t} = \frac{dn/dt}{n_{\lambda} - 1} - \alpha t;$$

$$W_{\lambda,t} = dn/dt + \alpha(n_{\lambda} - 1).$$

Первая из них относится к условиям постоянной температуры, отличной от 20 °С, вторая — к условиям неравномерного распределения температуры, что обычно и бывает при эксплуатации крупногабаритной оптической аппаратуры. Термооптические постоянные даются для трех длин волн (479,99; 546,07 и 643,85 нм) и для двух интервалов температур (от -60 до 20 °С и от -20 до 120 °С). Для более высоких температур, вплоть до нижней температуры отжига, значения термооптических постоянных можно вычислить с помощью двух линейных уравнений:

$$\frac{\Delta \bar{n}_{\text{абс}}}{\Delta t} = \alpha_{\text{норм}} + \varphi(t_{\text{ср}} - 20);$$

$$W_{\lambda,t} = W_{\text{норм}} + \theta(t_{\text{ср}} - 20).$$

Значения констант $\alpha_{\text{норм}}$, $W_{\text{норм}}$, φ , θ , измеренные при 20 °С, для всех отечественных стекол известны. $V_{\lambda,t}$ стандартизованных оптических стекол измеряется в очень широких пределах: от $-191 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ у стекла ЛК1 до $99 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ у стекла ЛК5. Это дает возможность легко подобрать комбинацию стекол, дающую малую термооптическую абберацию. Значения $W_{\lambda,t}$ почти у всех стекол положительны в пределах $(35 \div 65) \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Стекла ЛК1 и ФК14 имеют $W = -4 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, стекла ТФ10 и ТФ12 — $W = 125 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Ранее существовали лишь стекла ЛК1, ФК14, ФК5, ТК22, ВФ32 и ТБФ6 с малой термооптической постоянной $W_{\lambda,t}$. Оптические стекла с нулевыми и отрицательными значениями $W_{\lambda,t}$, которые в настоящее время уже внедрены в серийное производство, носят название атермальных.

В качестве примеров укажем на атермальный тяжелый крон ТК1621 с $W = -13 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, атермальный аналог ходового оптического стекла ТК14 — стекло ТК1419, которое при сохранении основных оптических постоянных имеет $W = -20 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ вместо $W = 56 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, новое стекло БК1008 с $W = 10 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, атермальный аналог стекла БФ13 — стекло БФ1320 с $W = -23 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ вместо $W = 59 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

При производстве стекла большое значение имеет вязкость стекла, которая определяет температуру выработки и отжига, а также температура варки стекол. На стадии обработки и эксплуатации стекол вязкость имеет значение лишь как фактор, ограничивающий применение стекла при высоких температурах. Стекло переходит из твердого состояния в пластичное при вязкости $1 \cdot 10^{12}$ Па·с. Вязкое течение связано с разрывом или переключением химических связей в стеклах, поэтому различные стекла имеют разный температурный ход вязкости [4].

49610

Для практики представляет интерес температура спекания стекол, которая определяется как температура спекания

Таблица 1.15. Температуры спекания некоторых оптических стекол

Марка стекла	Температура спекания, °С	Марка стекла	Температура спекания, °С
ТФ7	459	К8	720
ТФ5	490	БФ6	650
ЛК6	488	ТК9	631
ОФ5	520	ТК12	666
Ф2	535	СТК3	690

двух образцов стекла размерами 20 × 20 × 10 мм, положенных друг на друга полированными сторонами и нагреваемых со скоростью 2°С в минуту. Примеры температуры спекания оптических стекол приведены в табл. 1.15.

Механические свойства оптических стекол имеют большое значение для технолога-обработчика. Они во многом определяют трудоемкость механической обработки и возможность получения поверхностей высокого класса чистоты, так как мягкие стекла легко подвергаются царапанию. К механическим свойствам стекол относят плотность, оптический коэффициент напряжения, фотоупругие постоянные, модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент поперечной деформации, твердость по сошлифовыванию, микротвердость, прочность на изгиб [2, 11].

Плотность определяется отношением массы стекла к его объему. Данные о плотности при $t = 20^\circ\text{C}$ необходимы при расчете массы заготовок и оптических деталей (табл. 1.16).

Таблица 1.16. Плотность оптических стекол

Марка стекла	Плотность, г/см ³	Марка стекла	Плотность, г/см ³	Марка стекла	Плотность, г/см ³	Марка стекла	Плотность, г/см ³
ЛК5	2,27	БФ23	2,92	БФ12	3,67	ТК3	3,29
ЛК6	2,30	Ф9	2,93	БФ24	3,67	БФ19	3,36
ЛК7	2,30	ФК3	2,94	Ф4	3,67	ФК4	3,38
ЛК8	2,32	БК12	3,02	БФ13	3,82	ТК13	3,44
ЛК1	2,33	ЛФ11	3,02	БФ25	3,86	БФ27	3,46
ЛК4	2,33	БК13	3,04	ТФ1	3,86	БФ25	3,47
К1	2,36	ТК12	3,06	БФ28	3,96	ОФ4	3,48
К2	2,38	БФ18	3,07	ТК21	3,98	Ф6	3,48
ЛК3	2,46	ТК1	3,08	БФ16	4,02	ТК14	3,51
К3	2,47	БК9	3,10	ТФ2	4,09	БФ21	3,56
К5	2,47	БК10	3,12	СТК10	4,10	ТК16	3,56
КФ5	2,50	ТФ11	3,14	СТК9	4,11	Ф1	3,57
К17	2,51	ОФ3	3,15	СТК8	4,16	БФ31	3,57
КФ7	2,51	БФ6	3,16	СТК12	4,22	ТФ8	4,23
БК1	2,52	ТК2	3,20	ФК1	2,58	ТФ3	4,46
К8	2,52	ЛФ5	3,23	К16	2,58	ТБФ4	4,46
КФ6	2,52	ЛФ7	3,23	К20	2,61	ТБФ3	4,47
К14	2,53	БФ7	3,23	ЛФ9	2,61	ТФ7	4,52
ЛФ12	2,54	ФК23	3,24	К19	2,62	ТФ4	4,65
ОФ1	2,56	ТК20	3,58	ТК17	2,66	ТФ5	4,77
ЛФ8	2,57	ТК4	3,58	БФ1	2,67	ТБФ5	4,82
КФ4	2,57	Ф2	3,60	КФ8	2,68	ТФ10	5,19
БК2	2,57	ТК7	3,60	КФ1	2,69	СТФ1	6,68
СТК3	2,57	Ф8	3,61	КФ3	2,71	СТФ11	6,79
БК8	2,85	ТК8	3,61	ОФ2	2,71		
БК6	2,86	ТК9	3,62	ЛФ10	2,73		
ЛФ1	2,86	Ф7	3,63	К15	2,76		
БК11	2,91	Ф13	3,63	БК4	2,76		
БФ4	2,92	БФ11	3,66	БФ8	3,28		

Твердость по сошлифовыванию (табл. 1.17) характеризует сопротивление стекла разрушению абразивом. За единицу принята твердость стекла марки К8. Твердость стекол других марок определяется отношением объема сошлифованного стекла марки К8 к объему стекла испытываемой марки, сошлифованного при тех же условиях. Погрешность определения составляет 10—20 %.

Таблица 1.17. Значения относительной твердости по сошлифовыванию оптических стекол

Марка стекла	Относительная твердость	Марка стекла	Относительная твердость	Марка стекла	Относительная твердость
ЛК1	0,9	БК13	0,9	БФ18, БФ21,	0,9
ЛК3	0,9	ТК1, ТК17,	0,9	БФ25, БФ26,	
ЛК4	0,9	ТК23		БФ27	
ЛК5	1,6	ТК2—ТК21	0,7—0,8	БФ19, БФ23,	0,7
ЛК6	0,7	СТК3	0,8	БФ24, БФ28	
ЛК7	1,0	СТК7	0,5	ТБФ3	1,3
ФК1	0,4	СТК8	0,5	ТБФ4	1,7
ФК13	0,5	СТК9	3	ЛФ1, ЛФ10	0,9
ФК14	0,2	СТК12	3	ЛФ5, ЛФ8	0,8
К1	0,9	КФ1	0,9	ЛФ7, ЛФ11	0,7
К2—К20	1,0	КФ4	0,8	Ф1, Ф9	0,5
БК4	0,8	КФ5	1,2	Ф2, Ф4	0,6
БК6	0,9	КФ6	1,0	Ф6, Ф7, Ф8, Ф13	0,7
БК8	0,8	КФ7	0,8	ТФ1—ТФ10	0,5—0,6
БК9	0,8	КФ8	1,0	ТФ11	0,4
БК10	0,7	БФ1	1,0	ТФ12	0,8
БК11	0,9	БФ4	0,8	ОФ3	0,8
БК12	0,9	БФ6—БФ16	0,5—0,6	ОФ4	0,4
				ОФ5	0,3

Микротвердость (по Виккерсу) характеризует сопротивление поверхности вдавлению под известной нагрузкой алмазной пирамиды с углом при вершине 136°. Микротвердость рассчитывается как отношение нагрузки P к площади поверхности полученного пирамидального углубления, причем площадь рассчитывается по измеренной под микроскопом диагонали отпечатка

$$HV = 1,854P/d^2.$$

Очень часто указывается микротвердость материалов по Кнупу, когда алмазный наконечник оставляет ромбовидный отпечаток. В табл. 1.18 приведены значения, полученные С. Н. Державиным и А. В. Ивановым для оптических бесцветных и цветных стекол, а также для оптических бескислородных (так называемых халькогенидных) стекол ИКС23—ИКС30. До сих пор широко применяется относительная оценка твердости минералов по шкале Мооса (табл. 1.19).

Прочность стекла зависит от условий испытаний: физико-химического воздействия окружающей среды, например влажности воздуха, продолжительности действия нагрузки и скорости возрастания нагрузки, площади поверхности или объема, который подвергается действию нагрузки, наличия дефектов на поверхности в виде царапин, трещин, заколов, способа обработки поверхности, внутренних пороков (камней, пузырей, свилей), временного интервала между изготовлением образца и проведением испытаний. Условиям эксплуатации оптических деталей, закрепляемых в оправе по периметру, наиболее соответствует метод испытания прочности стекла на кольцевой центрально-симметричный изгиб. Предел прочности при изгибе (σ_a) рассчитывается по формуле

$$\sigma_a = \frac{3P}{2\pi d^2} \left[(1-\mu) \frac{a-b^2}{2r_0^2} + (1+\mu) \ln \frac{a}{b} \right],$$

Т а б л и ц а 1.18. Микротвердость оптических стекол

Марка стекла	Микротвердость H_K , ГПа	Марка стекла	Микротвердость H_K , ГПа	Марка стекла	Микротвердость H_K , ГПа	Марка стекла	Микротвердость H_K , ГПа
ЛК5	5,21	СТК9	6,23	БФ7	4,34	СС5	4,19
ЛК6	3,72	СТК12	5,95	БФ8	3,67	СС6	4,03
ЛК7	4,43	СТК19	5,60	БФ9	4,09	СС15	3,77
К8	4,98	БК6	4,36	БФ11	4,43	КС15	4,35
К108	5,04	БК8	5,04	БФ12	3,77	ЗС1	4,19
К208	5,17	БК9	5,04	БФ13	4,51	ЗС7	2,75
К19	4,79	БК10	4,54	БФ16	3,96	ЗС8	2,80
ТК2	4,56	БК13	4,73	БФ21	3,85	ЗС11	4,19
ТК4	4,42	КФ4	4,74	БФ24	3,93	ОС5	4,19
ТК8	4,31	КФ6	4,19	БФ27	4,17	ЖЗС5	4,30
ТК12	4,91	КФ7	4,38	БФ28	4,10	ЖЗС13	4,03
ТК13	4,88	ФК14	3,22	ТБФ3	4,34	СЗС9	3,81
ТК14	4,64	ЛФ5	3,51	ТБФ4	4,50	СЗС17	4,19
ТК16	4,73	ЛФ6	3,51	Ф104	3,47	СЗС24	4,44
ТК17	4,55	ЛФ11	4,03	ТФ1	3,31	УФС1	4,14
ТК20	4,49	ЛФ104	3,55	ТФ2	3,25	УФС2	3,22
ТК21	4,06	ЛФ105	3,55	ТФ4	2,93	УФС5	3,24
ТК23	4,86	ОФ1	3,73	ТФ5	3,22	УФС6	4,27
ТК102	4,31	ОФ5	3,48	ТФ7	2,98	МС14	3,74
ТК114	4,78	Ф1	3,50	ТФ8	3,22	ТС2	4,06
ТК116	4,52	Ф4	3,50	ТФ10	2,87	ТС4	4,11
ТК120	4,47	Ф13	3,70	ТФ12	3,53	ТС8	3,30
ТК121	4,17	Ф101	3,40	ТФ105	3,10	ИКС23	0,98
ТК123	4,81	БФ1	4,21	ТФ108	3,30	ИКС24	1,18
СТК3	4,76	БФ3	4,54	НС2	4,35	ИКС25	0,96
СТК7	4,12	БФ4	4,30	НС12	4,03	ИКС28	1,00
СТК8	4,17	БФ6	4,17	СС1	4,27	ИКС29	1,05
						ИКС30	1,46

где P — разрушающая нагрузка, Н; d — толщина образца, мм; a — радиус опорного кольца ($r_{\text{станд}} = 10$ мм), мм; b — радиус кольцевого пуансона, мм; r_0 — радиус образца, мм; μ — коэффициент Пуассона.

Т а б л и ц а 1.19. Шкала относительной твердости минералов

Минерал	Твердость по шкале Мооса	Минерал	Твердость по шкале Мооса
Тальк	1	Ортоклаз	6
Гипс	2	Кварц	7
Кальцит	3	Топаз	8
Флюорит	4	Корунд	9
Апатит	5	Алмаз	10

приложенной нагрузки и восстанавливать первоначальные размеры после ее снятия. Стекло сгибается упругим в области нагрузок, граничащих с пределом прочности.

Упругие свойства стекол характеризуются тремя величинами: E — модулем упругости (Юнга); G — модулем сдвига; μ — коэффициентом поперечной деформации (Пуассона), которые связаны между собой уравнением $E = 2G(1 + \mu)$.

Наименьшим модулем Юнга обладают легкие кроны ($3,9 \cdot 10^{10}$ Па), наибольшим — сверхтяжелые кроны ($1,2 \cdot 10^{11}$ Па). Коэффициент Пуассона (отношение поперечного сжатия к продольному растяжению) лежит в пределах $0,165-0,310$.

Фотоупругие постоянные C_1 и C_2 характеризуют зависимость показателя преломления стекла от его напряженного состояния. Изотропное стекло, будучи подвергнуто растяжению или сжатию, становится анизотропным, подобным одноосному кристаллу, направление оптической оси которого совпадает с направлением действия напряжения. Знание фотоупругих свойств необходимо при расчете режимов отжига, определении волновой аберрации систем при изменении температуры (в том числе оптических систем и активных элементов лазеров). Чтобы найти фотоупругие постоянные, интерферометрическим методом измеряют изменение показателя преломления, вызванное чистым изгибающим усилием. При этом показатель преломления зависит как от напряжения σ , так и от направления колебаний света:

$$n_{\parallel} - n_0 = C_1 \sigma;$$

$$n_{\perp} - n_0 = C_2 \sigma,$$

где n_0 — показатель преломления ненапряженного образца; n_{\parallel} — показатель преломления светового луча с направлением колебаний, параллельным направлению усилия; n_{\perp} — показатель преломления светового луча с направлением колебаний, перпендикулярным к направлению усилия.

При сжимающей нагрузке показатель преломления стекла увеличивается. В теории упругости сжимающие напряжения имеют отрицательный знак, поэтому C_1 и C_2 , как правило, также имеют отрицательный знак. Разница постоянных $C_1 - C_2 = ОКН$, но так как определение фотоупругих постоянных и ОКН производится по различным методикам, то могут встретиться случаи небольших численных расхождений между этими значениями: C_1 лежит в пределах $(+0,1 \div -6,1) 10^{-12}$ Па $^{-1}$; C_2 — в пределах $(-2,0 \div 6,8) 10^{-12}$ Па $^{-1}$.

К справочным характеристикам оптических стекол можно отнести не входящие в ГОСТ данные по спектрам и яркости люминесценции при возбуждении гамма-излучением, потоками электронов и протонов (радиолюминесценция) и ультрафиолетовым излучением (фотолюминесценция). Эти данные приходится учитывать для передних деталей оптических приборов (линзы, защитные окна). Они же могут быть использованы в случае необходимости разбраковки стекла спутанных марок. Данные приведены в руководящем техническом материале РТМ 3-145-71 «Стекло оптическое бесцветное. Спектры и яркости люминесценции. Справочные данные».

Развитие лазеров [10] заставило исследовать еще одну характеристику стекла и других оптических материалов — лучевую прочность (употребляется также термин оптическая прочность). В современных лазерах световой луч создает напряженность поля до десятков миллионов вольт на сантиметр. В этих условиях происходит электрострикция, т. е. сжатие вещества в местах наибольшей напряженности поля, и увеличение показателя преломления. Нарушение однородности показателя преломления приводит к самофокусировке излучения. Плотность самофокусированного потока достаточна для развития процессов ионизации, что влечет за собой разрушение образца, т. е. в случае коротких импульсов предел оптической прочности определяется не механизмом поглощения энергии, а нелинейными свойствами стекла, характеризующими его способность концентрировать световую энергию волны в канал диаметром 6—8 мкм, что приводит к увеличению плотностей потока до 1×10^{12} Вт/см 2 . Лучевая прочность при длительных импульсах определяется тепловым механизмом разрушения.

Установление механизма разрушения позволило связать лучевую прочность стекла при коротких импульсах с его показателем преломления и модулем упругости. Эта зависимость оказалась совпадающей с той, которая была теоретически выведена Ахмановым для условий самофокусировки пучка,

$$L = 4,5 \frac{\lambda^2 C}{\pi (n^2 + 2)(n^2 - 1)} E \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)},$$

где L — пороговая мощность.