

УДК 535.551

МОДЕЛЬ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

М.Е. Александров, Ю.Т. Нагибин, В.А. Трофимов, М.Л. Шванова

Рассмотрена возможность выполнения исследований напряженного состояния клеевых соединений оптических деталей с помощью эллипсометра компенсационного типа, работающего по схеме PCSA. Описывается математическая модель эллипсометрического исследования наведенного двулучепреломления в соединительном слое, вызванного интегральным эффектом фотоупругости.

Ключевые слова: клеевое соединение, напряженное состояние, эллипсометрия, соединительный слой, наведенное двулучепреломление, фотоупругость.

Введение

В приборостроении широко используются оптические методы соединения оптических деталей. К ним относятся клеевой метод, метод оптического контакта, метод глубокого оптического контакта и спекание. Эти методы предназначены для прочного соединения оптических деталей, при котором не происходит искажение трансформируемого склеиваемыми элементами изображения. Совершенствование методов соединения связано с тем, что каждое из них в той или иной степени вызывает так называемое напряженное состояние соединяемых деталей. Напряженное состояние проявляется в виде эффекта фотоупругости, связанного с изменением показателя преломления материала соединяемых деталей в области контакта, вызванного механическими напряжениями. Одним из распространенных способов исследования напряженного состояния оптических изделий является полярископия. Наблюдение картины интерференции поляризованного света, прошедшего исследуемый объект, позволяет выявить пространственную неоднородность его показателя преломления [1]. Такая методика удобна для качественной диагностики изделия. Количественная оценка имеет низкую точность и высокую трудоемкость.

Причины напряженного состояния оптических соединений

Причиной напряженного состояния могут служить:

- в случае оптического контакта – погрешности формы и чистота обработки соединяемых поверхностей;
- в случае клеевого соединения – неоднородность показателя преломления клея и механические напряжения, вызванные его высыханием;
- в случае спекания – остаточные механические напряжения в материале, вызванные термообработкой.

Рассмотрим напряженное состояние клеевого соединения, которое может быть представлено в виде двух стеклянных плоскопараллельных пластинок, соединенных между собой слоем оптического клея (рис. 1).

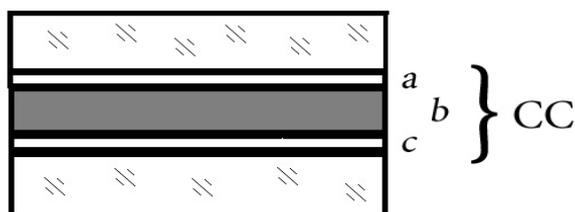


Рис. 1. Клеевое соединение в виде двух стеклянных плоскопараллельных пластинок, соединенных между собой слоем оптического клея «Соединяющий»: а – соединительный слой верхней стеклянной пластинки; б – соединительный клеевой слой; с – соединительный слой нижней стеклянной пластинки

Поверхностный слой пластинок вследствие механической обработки имеет показатель преломления и структуру поверхности, отличные от массива. Неоднородность этого слоя в сочетании с неоднородностью свойств оптического клея, связанной, в частности, с неоднородностью его объемного высыхания, позволяет воспользоваться моделью, где элемент элементарной поверхности может быть представлен в виде сферической оболочки (рис. 2).

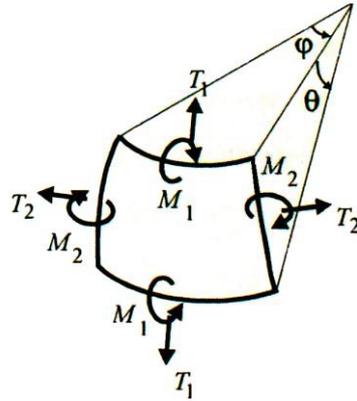


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние элементарного элемента оптического соединения

Напряженное состояние такого элемента содержит две составляющие: основное напряженное состояние и краевой эффект [1]. Первое определяет состояние всей поверхности элемента, второе, как правило, связано с локальными эффектами и имеет затухающий характер. Осесимметричный изгиб сферической поверхности характеризуется следующими соотношениями:

$$T_1 = T_1^*, \quad T_2 = T_2^* + T_2^k, \quad M_1 = M_1^k, \quad M_2 = M_2^* + M_2^k, \quad \Theta = \Theta^* + \Theta^k, \quad Q_r = Q_r^* + Q_r^k,$$

где T_1 и T_2 – нормальные усилия, направленные вдоль координатных линий $\varphi = \text{const}$ и $\Theta = \text{const}$; M_1 и M_2 – изгибающие моменты; Θ – угол поворота касательной к меридиану; Q_r – радиальное (перерезывающее) усилие. Здесь значками (*) обозначены величины в основном напряженном состоянии, а верхними индексами (k) – в случае краевого эффекта; зависимость от координаты Θ опущена [2].

Представленное описание позволяет детально, по точкам, исследовать напряженное состояние поверхности, но для большинства практических задач достаточно иметь оценку интегрального влияния соединяемого слоя. В таком случае совокупность элементов a, b, c (рис. 1) удобно выделить в неоднородную анизотропную подсистему «соединяющий слой» (СС), оценка качества которой и составляет предмет исследования.

Одноосное приближение напряженного состояния вблизи слоя клея

В первом приближении можно считать, что СС представляет собой одноосный непоглощающий кристалл. Главные показатели преломления обыкновенного и необыкновенного (экстраординарного) лучей в этом так называемом кристалле обозначим N_o и N_e соответственно. Такое приближение допустимо ввиду доминирования сил взаимодействия между СС и материалами подложек [3].

Для определения напряженного состояния деталей в непосредственной близости от СС достаточно измерить наведенное двулучепреломление и ориентацию оптической оси. Это обусловлено тем, что в исследуемых областях возникает преимущественно одноосное напряженное состояние. Просветное зондирование этих областей с обеих сторон от СС позволяет исследовать явления, вызванные интегральным эффектом фотоупругости, и оценить качество соединений.

Азимуты поляризатора, анализатора и быстрой оси компенсатора относительно вертикальной оси (плоскости падения светового пучка) обозначим через P, A и Q соответственно. В случае наблюдения минимума интенсивности на выходе прибора (нулевое положение поляризационных элементов) основное соотношение имеет вид

$$-\text{tg} A_0 = \rho_s \frac{\rho_c + \text{tg} C_0 \cdot \text{tg} P_0}{\rho_c \cdot \text{tg} C_0 - \text{tg} P_0}. \quad (1)$$

Величины A_0, C_0 и P_0 определяются как

$$A_0 = A - q, \quad C_0 = Q - q, \quad P_0 = Q - P,$$

где q – азимут оптической оси образца относительно плоскости падения светового пучка (направление действия ненулевого напряжения). Величины ρ_s и ρ_c являются эллипсометрическими отношениями амплитудных коэффициентов пропускания образца и компенсатора,

$$\rho_s = \frac{T_s^{(p)}}{T_s^{(s)}} = \left| \frac{T_s^{(p)}}{T_s^{(s)}} \right| \cdot \exp(i\delta_s), \quad \rho_c = \frac{T_c^{(p)}}{T_c^{(s)}} = \left| \frac{T_c^{(p)}}{T_c^{(s)}} \right| \cdot \exp(i\delta_c),$$

где $T^{(p)}$ и $T^{(s)}$ – амплитудные коэффициенты пропускания для p - и s -компоненты соответственно.

Для просветной эллипсометрии при нормальном падении светового пучка и малой величине двулучепреломления для образца и компенсатора можно считать, что

$$\left| \frac{T_s^{(p)}}{T_s^{(s)}} \right| \cong 1, \quad \left| \frac{T_c^{(p)}}{T_c^{(s)}} \right| \cong 1.$$

Тогда соотношение (1) будет иметь вид

$$-\operatorname{tg} A_0 = \exp(i\delta_s) \frac{\exp(i\delta_c) + \operatorname{tg} C_0 \cdot \operatorname{tg} P_0}{\exp(i\delta_c) \cdot \operatorname{tg} C_0 - \operatorname{tg} P_0} \quad (2)$$

или, при комплексной форме записи,

$$\operatorname{tg} A_0 \cdot \exp(i\pi) = B \cdot \exp(i\delta_s) \cdot \exp(i\delta_B), \quad (3)$$

где

$$B = \left| \frac{\exp(i\delta_c) + \operatorname{tg} C_0 \cdot \operatorname{tg} P_0}{\exp(i\delta_c) \cdot \operatorname{tg} C_0 - \operatorname{tg} P_0} \right|, \quad \delta_B = \arg \left(\frac{\exp(i\delta_c) + \operatorname{tg} C_0 \cdot \operatorname{tg} P_0}{\exp(i\delta_c) \cdot \operatorname{tg} C_0 - \operatorname{tg} P_0} \right).$$

При фазовом сдвиге компенсатора $\delta_s \cong \pi/2$ можно получить выражение

$$B = \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 C_0 \cdot \operatorname{tg}^2 P_0}{\operatorname{tg}^2 C_0 + \operatorname{tg}^2 P_0}} = \sqrt{\frac{1 + \cos 2P_0 \cdot \cos 2C_0}{1 - \cos 2P_0 \cdot \cos 2C_0}}.$$

Таким образом, величина $B^2 = \operatorname{tg}^2 A_0$ является $W(x)$ -преобразованием вида

$$W(x) = \frac{1+x}{1-x},$$

где $x = \cos 2P_0 \cdot \cos 2C_0$.

Воспользуемся обратным W^{-1} -преобразованием:

$$W^{-1}(W(x)) = W^{-1}(\operatorname{tg}^2 A_0) = \frac{\operatorname{tg}^2 A_0 - 1}{\operatorname{tg}^2 A_0 + 1} = \cos 2P_0 \cdot \cos 2C_0 = x,$$

на основе которого получим выражение

$$-\cos 2A_0 = -(\cos 2A \cdot \cos 2q + \sin 2A \cdot \sin 2q) = \cos 2P_0 \cdot \cos 2C_0 = x.$$

В случае $Q = \pm \pi/4$ величина x равна $\sin 2P \cdot \sin 2q$, откуда следует

$$\operatorname{tg} 2q = -\frac{\cos 2A}{\sin 2A + \sin 2P}$$

или

$$q = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(-\frac{\cos 2A}{\sin 2A + \sin 2P} \right). \quad (4)$$

При решении уравнения (2) относительно основных эллипсометрических параметров следует учитывать условие равенства нулю его мнимой части [2]. Рассмотрение мнимой части уравнения $\pi - \delta_s - \delta_B = 0$ показывает, что

$$\delta_B = \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} C_0 \operatorname{tg} P_0} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} C_0}{\operatorname{tg} P_0} \right) = \pi + \operatorname{arctg} \left(\frac{(1 + \operatorname{tg}^2 C_0) \cdot \operatorname{tg} P_0}{(\operatorname{tg}^2 P_0 - 1) \cdot \operatorname{tg} C_0} \right) = \pi + \operatorname{arctg} \frac{-\operatorname{tg} 2P_0}{\sin 2C_0}.$$

В случае $Q = \pm \pi/4$ это выражение преобразуется к виду

$$\delta_B = \pi + \operatorname{arctg} \frac{\mp 1}{\operatorname{tg} 2P \cdot \cos 2q},$$

откуда

$$\delta_s = \operatorname{arctg} \frac{\pm 1}{\operatorname{tg} 2P \cdot \cos 2q}. \quad (5)$$

На основании выражения (4) и соотношений

$$\cos 2q = \sqrt{1 - \sin^2 2q}, \quad \sin^2(\operatorname{arctg} x) = \frac{x^2}{1+x^2}, \quad x = \frac{-\cos 2A}{\sin 2A + \sin 2P},$$

$$\cos 2q = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} = \frac{\sin 2A + \sin 2P}{\sqrt{1 + \sin^2 2P + 2 \sin 2A \sin 2P}}$$

можно получить:

$$\delta_s = \operatorname{arctg} \left(\pm \frac{\sqrt{1 + \sin^2 2P + 2 \sin 2A \sin 2P}}{(\sin 2A + \sin 2P) \cdot \operatorname{tg} 2P} \right) = \operatorname{arctg} \left(\pm \frac{\sqrt{(1 - \sin^2 2A) + (\sin 2A + \sin 2P)^2}}{(\sin 2A + \sin 2P) \cdot \operatorname{tg} 2P} \right). \quad (6)$$

Таким образом, выражения (4), (5) или (6) позволяют определить по азимутам поляризатора, анализатора и большой оси компенсатора ($Q = \pm \pi/4$) в положении гашения ориентацию оптической оси и относительную разность фаз, возникающую в результате интегрального эффекта фотоупругости. Следу-

ет указать, что данные соотношения являются исключительно математическим отображением реально существующих зависимостей.

Наведенное двулучепреломление определяется зависимостью

$$\Delta n = N_o - N_e = \frac{\delta_s}{k_0 \cdot L} = \frac{\delta_s \cdot \lambda}{2\pi \cdot L},$$

где L – длина пути светового пучка в образце, равная для плоскопараллельной пластинки при нормальном падении света ее толщине; λ – длина волны монохроматического излучения. Если полученное значение положительно, то имеем случай одноосного сжатия, если отрицательно – растяжения.

Длина пути светового пучка в образце значительна, поэтому точность определения удельного двулучепреломления ($\Delta n / L$) имеет порядок 10^{-5} – 10^{-6} . На точность определения наведенного двулучепреломления также оказывает влияние близость краев соединений, что особенно существенно для соединений по узкой стороне. При малой величине наведенного двулучепреломления Δn добавка в фазовый сдвиг δ_s , учитывающая многократные отражения в оптических измерениях, является настолько малой величиной, что ей можно пренебречь.

Ненулевое по абсолютному значению напряжение в плоскости, перпендикулярной направлению просвечивания, вычисляется по закону Вертгейма:

$$\sigma = -\frac{\delta_s \cdot \lambda}{2\pi L C_\sigma} = \frac{-\Delta n}{C_\sigma}.$$

Это выражение является физически верным, поскольку дает отрицательное значение при сжатии и положительное – при растяжении. Если рассматривать напряженное состояние в более общем случае, то σ является «добавочным напряжением» к всестороннему растяжению или сжатию.

Заключение

Анализ поляризационно-оптических свойств оптических соединений показывает, что предлагаемая методика позволяет определить не только толщины и показатели преломления зоны оптического контакта, но и сильно градиентной области соединяемых поверхностей элементов, прилегающей к зоне непосредственного оптического контакта поверхностей деталей 1 и 2 (рис. 3), выполненных из стекла марки К8.

Таким образом, для введенных оптических характеристик зоны контакта поверхности элементов оптического соединения представляется целесообразным использовать неразрушающий метод отражательной обобщенной эллипсометрии, отличающийся локальностью и высокой точностью. Этот метод позволяет установить влияние наведенного двулучепреломления на оптические характеристики клеевой сборки в целом. На рис. 3 представлен пример исследования зависимости изменения показателя преломления (n) от толщины ($d_{ок}^* = 130$ нм; $n_{ок}^* = 1,4024$), соединяющего детали 1 и 2. Поляризационные параметры Δ и Ψ измерены на эллипсометре компенсационного типа ЛЭФ-3М, работающем по схеме PCSA. При длине волны источника излучения $\lambda = 0,6328$ мкм погрешность измерения азимутов поляризующих элементов составляет $S_{p,A} = 1'$, а установка угла падения светового пучка $S_\theta = 0,5'$.

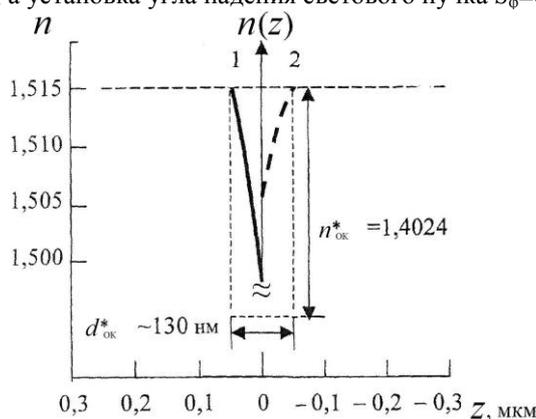


Рис. 3. Изменение показателя преломления $n(z)$ в оптическом контакте деталей 1 и 2, выполненных из стекла К8 ($n = 1,51466$)

Литература

1. Моссаковский В.И., Гудрамович В.С., Макеев Е.М. Контактные взаимодействия элементов оболочечных конструкций. Институт технической механики АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1988. – 288 с.

2. Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. Линейная теория тонких оболочек. – Л.: Политехника, 1991. – 656 с.
3. Демидов И.В., Лисицын Ю.В., Храмцовский И.А., Шеломова О.А. Особенности применения метода Фурье спектроэллисометрии в технологическом контроле клеевых соединений оптических элементов автоклавируемых трубок // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). – 2002. – № 5. – С. 148–152.

- Александров Максим Евгеньевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, max.alx@gmail.com
- Нагибин Юрий Тихонович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, nagibin77@mail.ru
- Трофимов Владимир Анатольевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, troftu@mail.ru
- Шванова Мария Леонидовна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, shvanova_m@mail.ru