

УДК 620.171.5

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФОТОУПРУГОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМПАКТ-ДИСКАХ

С. И. Герасимов

Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049 Новосибирск

Стабильность размера и формы изделия особенно важна в современных высоких технологиях, в частности при использовании компакт-дисков для хранения информации. Существенное влияние на такую стабильность оказывают остаточные напряжения, появляющиеся в дисках из-за несовершенства процесса их производства. Целью данной работы являлась разработка простого оптического метода оценки напряженного состояния компакт-дисков.

Ключевые слова: остаточные напряжения, релаксация, фотоупругость.

**Введение.** Остаточные напряжения играют важную роль в обеспечении длительной пригодности современных компакт-дисков (CD). Иногда перераспределение остаточных напряжений является причиной инициирования трещин в дисках на одной из стадий производства, или такое перераспределение увеличивает их до критического значения, когда даже незначительная внешняя нагрузка приводит к разрушению CD. Релаксация — одна из основных причин перераспределения остаточных напряжений, причем этот процесс может происходить без внешнего силового воздействия или нагрева. Релаксация остаточных напряжений может приводить к изменению размеров и формы исследуемого объекта, что недопустимо в современных высоких технологиях, в частности при изготовлении и последующем использовании CD для хранения информации.

Современные CD изготавливаются из поликарбоната, обладающего эффектом двулучепреломления. Это позволяет производить оценку напряжений в них методом фотоупругости. Металлизированное покрытие, нанесенное на одну из поверхностей CD, обеспечивает идеальные условия для регистрации интерференционной картины, наблюдаемой в отраженном свете. При исследовании напряжений в CD с использованием отражательного V-образного полярископа разрешающие уравнения становятся подобными тем, которые применяются в методе фотоупругих покрытий. В настоящей работе обсуждаются результаты исследования остаточных напряжений в CD с различным временем эксплуатации, произведенных разными изготовителями и по различным технологиям (штамповка, лазерная запись).

**1. Описание методики.** Фотоупругость — экспериментальный метод анализа напряжений и деформаций, особенно полезный при исследовании объектов сложной геометрии и при сложных условиях нагружения. В некоторых случаях теоретические методы могут быть трудоемкими или вообще неприменимыми, тогда экспериментальный анализ становится предпочтительнее при исследовании пространственных задач, проблем динамического нагружения, остаточных напряжений и неупругого поведения материалов [1].

Свет распространяется в воздухе со скоростью  $C = 3 \cdot 10^8$  м/с. В прозрачных телах скорость  $V$  ниже, и отношение  $C/V$  называется показателем преломления. В однородной среде этот показатель постоянен и не зависит от направления распространения или ориентации плоскости колебаний вектора напряженности электрического поля световой

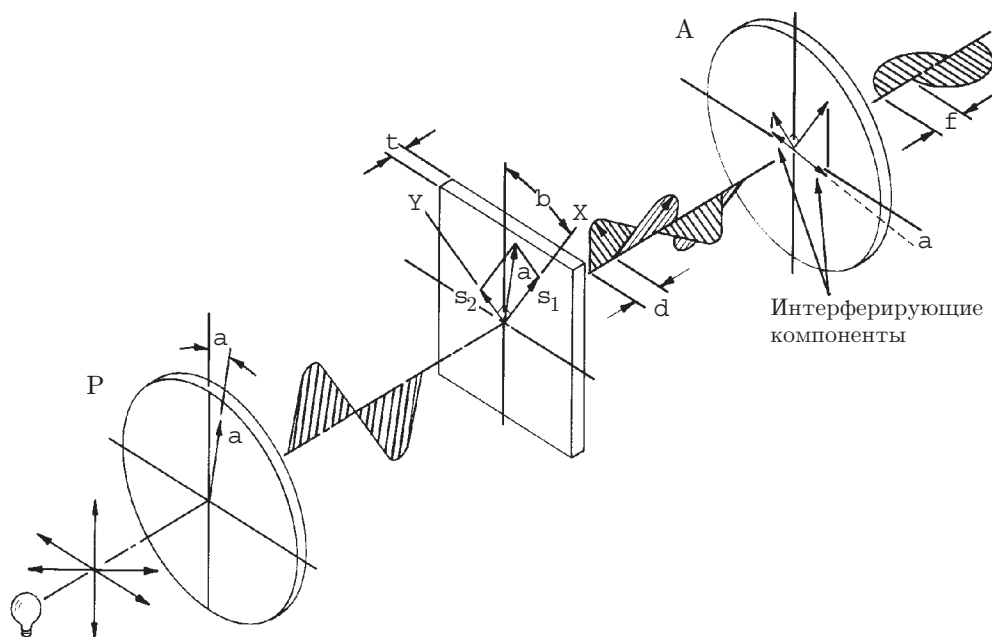


Рис. 1. Плоский полярископ (P — поляризатор, A — анализатор,  $\delta$  — задержка,  $\varphi$  — сдвиг фазы)

волны. Некоторые материалы, особенно пластмассы, являются изотропными при отсутствии нагрузки, но становятся анизотропными при нагружении. Изменение показателя преломления под нагрузкой аналогично изменению сопротивления в тензодатчиках [2].

Когда пучок поляризованного света с амплитудой  $a$  распространяется через CD, изготовленный из поликарбоната толщиной  $t$ , он разделяется на два поляризованных пучка, распространяющихся в плоскостях  $X$  и  $Y$ , совпадающих с направлениями главных напряжений в рассматриваемой точке (рис. 1). Если напряжения вдоль осей  $X$  и  $Y$  равны  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , и скорость света в этих направлениях  $V_x$  и  $V_y$  соответственно, то относительное замедление  $\delta$  между этими двумя лучами равно

$$\delta = C(t/V_x - t/V_y) = t(n_x - n_y), \quad (1)$$

где  $n$  — коэффициент преломления.

Согласно закону Брюстера

$$n_x - n_y = K(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (2)$$

Постоянная  $K$  называется коэффициентом оптической активности и характеризует физические свойства материала. Эта постоянная обычно определяется калибровкой и аналогична чувствительности тензодатчиков омического сопротивления. Из (1), (2) имеем:

$$\delta = tK(\sigma_1 - \sigma_2) \text{ — при пропускании,}$$

$$\delta = 2tK(\sigma_1 - \sigma_2) \text{ — при отражении (свет проходит через образец дважды).}$$

Следовательно, основное соотношение для вычисления напряжений по методу фотоупругости имеет вид

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \delta/(2tK) = N\lambda/(2tK). \quad (3)$$

Из-за относительной задержки  $\delta$  эти две световые волны больше не синфазны, когда проходят через плоский образец. Анализатор A пропускает только одну компоненту из этих двух волн (ту, которая параллельна оси анализатора), как показано на рис. 1. Эти

волны интерферируют, и результирующая интенсивность является функцией задержки  $\delta$  и угла между осью анализатора и направлением главных напряжений  $\beta - \alpha$ .

В случае плоского поляризатора интенсивность  $I$  света равна

$$I = a^2 \sin^2 2(\beta - \alpha) \sin^2 (\pi\delta/\lambda).$$

Интенсивность света равна нулю при  $\beta - \alpha = 0$  или когда скрещенный анализатор/поляризатор параллелен направлению главных напряжений. Таким образом, плоский полярископ используется для измерения направления главных напряжений [3].

**2. Анализ картины полос.** Фотоупругость позволяет дать интерпретацию картины полос по всему полю, оценить номинальные величины напряжений и градиентов, провести количественные измерения. В частности, можно определить направления главных напряжений во всех точках фотоупругой модели, величину и знак тангенциальных напряжений вдоль свободных границ и на всех участках, где напряженное состояние является одноосным; при плоском напряженном состоянии — величину и знак разности главных напряжений в выбранных точках исследуемого объекта.

Методом фотоупругости можно идентифицировать перегруженные и недогруженные области. Успешное применение метода зависит только от точного определения цвета полосы (изохромы) и от соотношения между порядком полосы и величиной напряжения [4].

При последовательном нагружении образца изохромы сначала появляются в наиболее нагруженных точках. По мере увеличения нагрузки новые полосы появляются на поверхности изделия и сдвигаются в зону с наименьшим уровнем напряжений. Полосам могут быть присвоены порядковые номера (1-я, 2-я, 3-я и т. д.) по мере их возникновения, и они сохраняют свои индивидуальные номера при изменении нагрузки. Изохромы появляются последовательно, никогда не пересекаются и не сливаются друг с другом, они всегда занимают свое положение в строгой очередности.

**3. Экспериментальные результаты.** Исследованные экземпляры CD были отобраны из различных видов CD — музыкальных и цифровых. На некоторых из них информация была записана промышленным способом, на других — на CD-Writer при проведении исследования. При наблюдении CD в отражательном полярископе изохромы появлялись в виде последовательных цветных полос, у которых каждая точка соответствовала различной степени двулучепреломления и, следовательно, различным напряжениям исследуемого участка. Учитывая неизменность последовательности, с которой появляются цвета, фотоупругая картина полос может читаться как топографическая карта, позволяющая визуализировать распределение напряжения по поверхности исследуемой части CD.

На рис. 2, *a, б* представлены типичные картины полос для музыкальных компакт-дисков, произведенных различными фирмами в России и за рубежом в 1993–1997 гг. Информация на CD упакована с очень высокой плотностью. Размеры каждого пита (элементар-

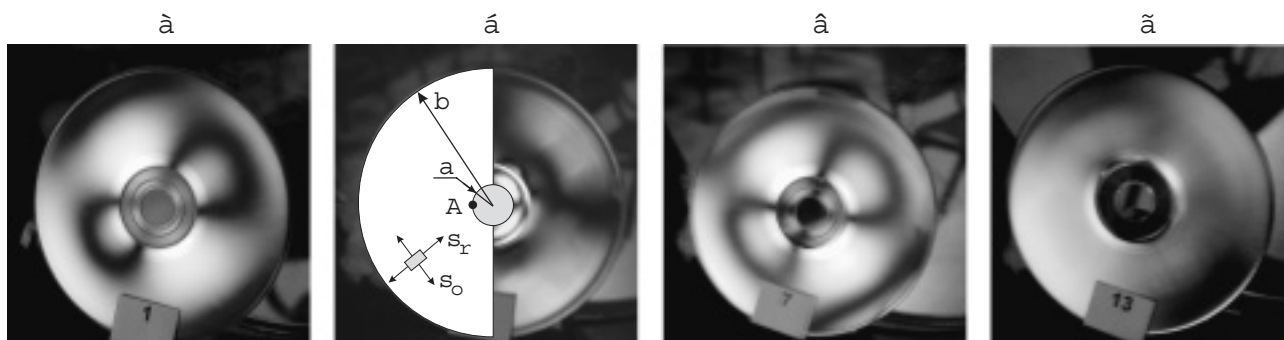


Рис. 2. Картины полос в различных типах CD

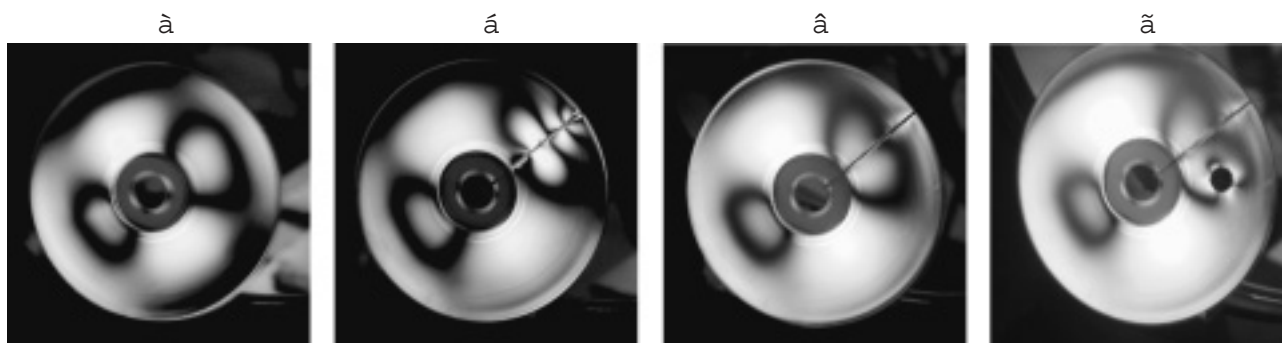


Рис. 3. Картины полос при разрушении CD

ной ячейки) весьма малы — около 0,6 мкм, и шаг спирали, записываемой на поверхности диска, составляет только 1,6 мкм. В процессе промышленного изготовления CD расплавленный поликарбонат подается в матрицу под высоким давлением. Давление необходимо для формирования питов хорошего качества. Время изготовления одного диска приблизительно 4 с, что неизбежно приводит к возникновению неоднородного поля напряжений и соответствующей картины полос.

На свободном контуре CD главные напряжения  $\sigma_1$  или  $\sigma_2$ , нормальные к контуру, равны нулю. Тогда из уравнения (3) следует, что порядок полосы  $N$  на таком контуре пропорционален нормальному напряжению  $\sigma_\theta$ , действующему вдоль контура. На рис. 2,б в точке А, лежащей на внутреннем свободном контуре,  $N \approx 1$ . Принимая для CD из поликарбоната коэффициент оптической чувствительности равным 7 кН/м [5], толщину  $t = 1,2$  мм, получаем в этой точке  $\sigma_\theta = 2,9$  МПа. Поэтому напряжением  $\sigma_\theta$  пренебрегать нельзя, так как предел пропорциональности для поликарбоната составляет  $\sigma_B = 3,5$  МПа [5].

Та же методика использовалась для получения фотоупругой картины при анализе напряжений в цифровых CD. Полученные при этом картины полос представлены на рис. 2,в,г. Легко заметить, что картина полос на рис. 2,в подобна той, что показана на рис. 2,а. Отсутствие заметной картины полос на рис. 2,г позволяет говорить о более высоком качестве этого экземпляра CD.

Взяв целый диск с начальной картиной полос (рис. 3,а) и применяя последовательное фрезерование радиальной канавки, мы наблюдали возникновение полос в точках с максимальным уровнем напряжений (рис. 3,б). Пример фотоупругой картины после сквозного прорезания CD показан на рис. 3,в. Рис. 3,г получен при сверлении отверстия в CD. Такой прием является стандартным при определении остаточных напряжений по методу отверстий. Наличие в CD отверстия привело к перераспределению остаточных напряжений.

В процессе записи-считывания информации в CD возникают дополнительные эксплуатационные напряжения, вызванные вращением диска. Задача о распределении напряжений в круглом вращающемся диске малой толщины подробно рассмотрена в [6]. С учетом обозначений рис. 2,б имеем:

$$\sigma_r = \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 \left( b^2 + a^2 - \frac{a^2 b^2}{r^2} - r^2 \right), \quad \sigma_\theta = \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 \left( b^2 + a^2 + \frac{a^2 b^2}{r^2} - \frac{1 + 3\nu}{3 + \nu} r^2 \right),$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\rho$  — масса единицы объема материала диска;  $\omega$  — угловая скорость вращения;  $a$ ,  $b$  — соответственно внутренний и внешний радиусы;  $r$  — текущий радиус точки диска. На внутреннем свободном контуре диска  $\sigma_r = 0$ , а окружное напряжение  $\sigma_\theta$  достигает максимума:

$$\sigma_{\theta \max} = \frac{3 + \nu}{4} \rho \omega^2 \left( b^2 + \frac{1 - \nu}{3 + \nu} a^2 \right).$$

В нашем случае  $a = 1,5$  мм,  $b = 120$  мм,  $\rho = 1,2$  г/см<sup>3</sup>,  $\nu = 0,38$ ,  $\omega = 1000$  об/мин,  $\sigma_\theta = 0,16$  МПа. Существующие тенденции увеличения скорости вращения CD делают проблему оценки остаточных технологических напряжений весьма актуальной, так как при их сложении с эксплуатационными напряжениями условие прочности может оказаться нарушенным.

**Выводы.** Показана возможность оценки остаточного напряженного состояния в компакт-дисках с помощью простого оптического метода. Неравномерное распределение технологических остаточных напряжений в дисках и их релаксация с течением времени могут привести к потере записанной на диске информации. Результаты исследования показывают, что CD от разных фирм-производителей различаются по характеру картины полос. Лишь в отдельных экземплярах исследованных образцов уровень остаточных напряжений был ниже порога чувствительности схемы интерферометра. Результаты проведенных экспериментов можно рекомендовать для внедрения на заводах-изготовителях CD для оперативного неразрушающего оптического контроля технологических процессов и для выходного контроля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Introduction** to stress analysis by the photostress method. Tech Note 702. Vishay Measurements Group, Inc. Raleigh, North Carolina, 1989.
2. **Frocht M. M.** Photoelasticity. N.Y.: John Wiley and Sons, 1941.
3. **Александров А. Я., Ахметзянов М. Х.** Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973.
4. **Чернышев Г. Н., Попов А. Л., Козинцев В. М. и др.** Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука, 1996.
5. **Экспериментальная механика:** В 2 кн. М.: Мир, 1990. Кн. 1.
6. **Тимошенко С. П., Гудьер Дж.** Теория упругости. М.: Наука, 1979.

*Поступила в редакцию 14/І 2003 г.,  
в окончательном варианте — 28/VII 2003 г.*

---