

УДК 620.171

## КОНТРОЛЬ СТАБИЛЬНОСТИ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ

С.А. Чугреев, С.И. Герасимов

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

E-mail: Gerasimov@stu.ru

*Выполнен расчетно-экспериментальный анализ напряженного состояния в оптических носителях информации, возникающего при напылении светоотражающего слоя. Установлена корреляция характера интерференционных полос и технологических производственных операций.*

**Ключевые слова:**

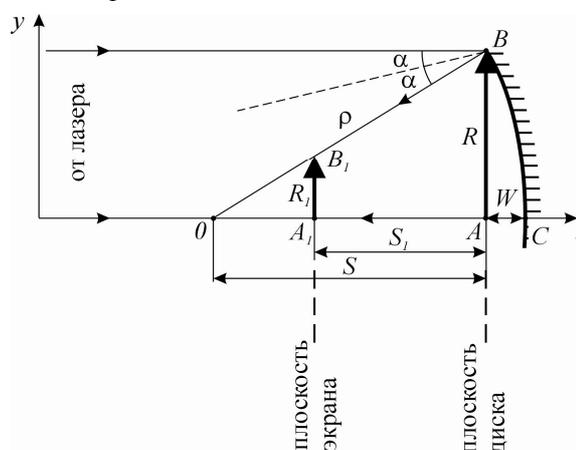
*Неразрушающий контроль, напряженное состояние, изгибные деформации, интерференция.*

Под оптическими носителями информации будем понимать совокупность различных видов компакт-дисков (КД), изготовленных из поликарбоната [1]: *CD, CD-R, CD-RW, DVD±R, DVD±RW, DVD-5, DVD-9, DVD-10*. Здесь приняты следующие стандартные обозначения типов КД: *CD* – КД емкостью 750 Мб, изготовленные методом репликации; *CD-R* – записываемые КД емкостью 750 Мб; *DVD-5* – КД емкостью 4,7 Гб, изготовленные методом репликации; *DVD±R* – записываемые КД емкостью 4,7 Гб; *DVD-9* – двухслойные односторонние КД емкостью 9,4 Гб, изготовленные методом репликации; *DVD-10* – двухсторонние КД емкостью 9,4 Гб, изготовленные методом репликации.

Известно, что при производстве КД применяют различные методы контроля оптико-геометрических параметров [2]. В частности, в каждой точке объекта возможен контроль двойного лучепреломления. Предполагается, что КД остается идеально плоским на всех технологических этапах производств – от изготовления исходной заготовки из поликарбоната до напыления светоотражающего слоя и нанесения защитного слоя лака. Вместе с тем, хорошо известно влияние даже тонких поверхностных металлизированных слоев на изгиб пластин, изготовленных из низко модульных материалов. Визуально было обнаружено, что многие КД имеют блюдцеобразные изгибные деформации, ориентированные вдоль собственной оси вращения. Была выдвинута гипотеза, что такое осесимметричное искривление дисков возможно из-за того, что напыляемый металлизированный слой приводит к появлению радиальных касательных напряжений на одной из поверхностей КД, определяющих прогибы диска.

Новым в предлагаемом способе определения напряженного состояния КД является соединение метода конечных элементов с оптической интерферометрией. Исследовались диски разных типов и толщин – сплошные с односторонним напылением (*CD, CD-R, CD-RW*), составные с внутренним напылением (*DVD, DVD±R, DVD±RW*), отдельные части составных дисков, как с напылением, так и без напыления. Диски закреплялись жестким зажимом вблизи внешнего контура и располагались вертикально.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки

Плоская монохроматическая волна света от лазера освещает поверхность КД. Направления освещения и отражения определяются углом  $\alpha$ , лежащим в плоскости  $uoz$  (рассмотрим плоский случай). Предположим, что в результате напыления светоотражающего слоя диск изогнулся и принял форму части сферы. В этом случае все параллельные оси  $z$  лучи света, отражаясь от КД, пересекутся в одной точке  $O$ , называемой фокусом. Введем обозначения:  $R=AB$  – радиус КД;  $R_1=A_1B_1$  – радиус изображения КД в плоскости экрана;  $S_1=AA_1$  – расстояние от КД до экрана;  $S=OA$  – расстояние от точки  $O$  до плоскости КД;  $W$  – стрела прогиба КД, подлежащая определению;  $\rho=OB$  – расстояние от точки  $B$  до фокуса  $O$ .

Из рис. 1 следуют очевидные соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{R}{S} &= \frac{R_1}{S - S_1}, \\ S &= \frac{RS_1}{R - S_1}, \\ \rho &= \sqrt{S^2 + R^2}, \\ W &\cong \rho - S = \frac{\sqrt{R^2 S_1^2 + R^4 - 2R^3 R_1 + R^2 R_1^2} - RS_1}{R - R_1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Ур. (1) является приближенным, но позволяет корректно определить порядок величины прогиба  $W$ . В пределе при  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $S_1 \rightarrow \infty$  имеем случай абсолютно плоского КД и из (1) получаем  $W \rightarrow 0$ .

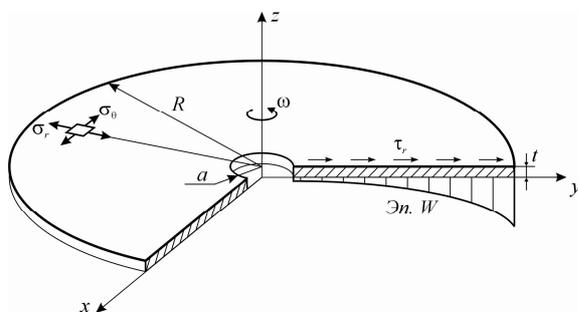
Были отобраны 7 образцов, имеющих изгибные деформации одного знака. В нашем случае  $R=60$  мм,  $S_1=1265$  мм. Результаты экспериментальных измерений  $R_i$  и вычисления  $W$  приведены в таблице.

**Таблица.** Экспериментальное определение изгибных деформаций дисков

Тип образца	$R_i$ , мм	$W$ , мм
CD	49,0	0,26
CD	50,0	0,24
CD	52,3	0,18
CD	55,5	0,11
DVD-5	45,0	0,36
DVD-5	57,3	0,07
DVD-10	54,0	0,14

Абсолютная погрешность вычисления  $\Delta W$  определялась для случая косвенных измерений с использованием процедуры численного дифференцирования в среде Maple 12 и составила 0,02 мм. Абсолютные ошибки измерения  $\Delta R_i$ ,  $\Delta R_1$ ,  $S_1$  принимались равными 0,5 мм. Таким образом, экспериментально был определен диапазон реальных прогибов КД от 0 до 0,35 мм.

Выполненные экспериментальные исследования позволили сформулировать гипотезу о распределении касательных напряжений  $\tau_r(x,y)$  на поверхности КД – закон изменения  $\tau_r$  аналогичен изменению прогиба  $W(x,y)$ , рис. 2.



**Рис. 2.** Расчетная модель КД

Для того чтобы выяснить, как по замеренным перемещениям  $W(x,y)$  определить в диске напряжения  $\tau_r(x,y)$ , нужно или провести тарировочные эксперименты, или выполнить серию расчетов по определению  $W$ , чтобы, сравнив замеренные перемещения с расчетными, получить искомые напряжения. Такие расчеты были проведены.

В качестве расчетной теоретической модели была взята следующая: требуется решить трехмерную задачу теории упругости при заданных на нижней поверхности диска перемещениях

$$W(x, y) = -0,3556x^2 - 0,3556y^2. \quad (2)$$

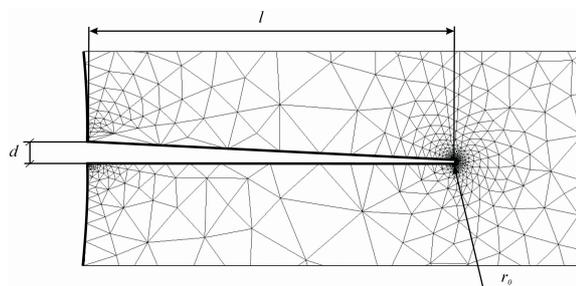
В качестве граничных условий были заданы нулевые перемещения по внутреннему контуру радиуса  $a$

(рис. 2). Расчет производился с использованием программного комплекса COSMOSWorks 2007, реализующего метод конечных элементов [3]. Средний размер тетраэдрических конечных элементов равен 0,76 мм при допуске 0,00038 мм. Результаты численного расчета:  $(\tau_r)_{\min}=114$  кПа на внутреннем контуре КД и  $(\tau_r)_{\max}=625$  кПа на внешнем контуре КД. Решение термоупругой задачи для того же образца при выполнении условия (2), позволило определить приращение температуры  $\Delta T$  верхней поверхности КД в процессе напыления светоотражающего слоя в диапазоне 0,5...5 °С, что позволяет сделать вывод: технологическая операция нанесения светоотражающего покрытия не приводит к существенному нагреву диска или к его заметным деформациям.

В то же время расчеты показывают, что при росте значений  $\Delta T$  наблюдается быстрый рост величины прогиба КД в плоскости, перпендикулярной плоскости диска: при  $\Delta T=10$  °С прогиб составит 0,9 мм, а при  $\Delta T=20$  °С – уже 1,8 мм. Таким образом, справедливы рекомендации по хранению КД в затененных местах и недопустимости их одностороннего нагрева (например, солнечными лучами).

На следующем этапе оценивалось влияние технологических касательных напряжений  $\tau_r$  на напряженное состояние вращающегося КД. Для этого было проведено сравнение экстремальных значений радиальных перемещений  $u_r$  и нормальных напряжений  $\sigma_r$ , рассчитанных по двум моделям: модель вращающегося бездефектного КД без касательных напряжений по верхней грани и аналогичная модель с приложенными касательными напряжениями величиной  $\tau_{\max}$ . Увеличение уровня перемещений и уровня напряжений для модели с приложенными касательными напряжениями составило около 2,2 %.

Для аналогичной пары моделей с трещиновидным концентратором (длина трещины  $l=2$  мм, ширина раскрытия  $d=0,1$  мм, радиус кривизны в вершине трещины  $r_0=7$  мкм) (рис. 3) увеличение уровня перемещений и уровня напряжений столь же невелико, что позволяет сделать вывод о незначительном влиянии напыления отражающего слоя на напряженное состояние КД.



**Рис. 3.** Вид концентратора и конечно-элементной сетки

При конечно-элементных расчетах предполагалось, что КД является идеально плоским и имеет толщину  $t=1,2$  мм во всех точках. Для проверки этого предположения было проведено исследование

интерференционных картин, получающихся при освещении КД со стороны рабочей поверхности когерентным светом с длиной волны  $\lambda=632,8$  нм. Оптическая схема экспериментальной установки аналогична представленной на рис. 1.

Было исследовано 70 КД различных типов. Анализ полученных интерференционных картин позволяет выделить два типичных вида (рис. 4):

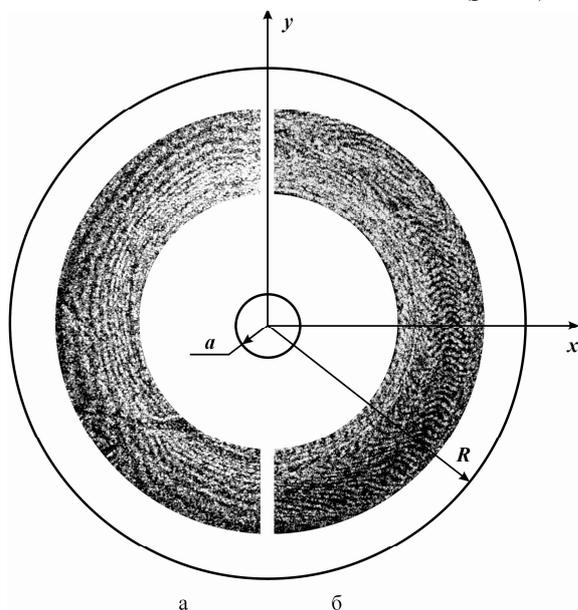


Рис. 4. Фрагменты типичных интерференционных картин для КД: а) концентрические окружности; б) характерный сдвиг полос

- 1) концентрические окружности по всей поверхности диска или по части поверхности (рис. 4, а) встречаются в 20 % случаев, характерны преимущественно для КД типа *CD-R*. Такая картина соответствует линейному изменению толщины КД по радиусу диска, что позволяет оценить максимальную разнотолщинность  $\Delta t$  КД:

$$\Delta t = \frac{N\lambda}{2n},$$

где  $N$  – порядковый номер полосы,  $\lambda$  – длина волны когерентного света,  $n$  – показатель преломления поликарбоната.

Для диска, рис. 4, а,  $N=15$ ,  $n=1,6$ , соответственно  $\Delta t=30$  мкм. Такая разнотолщинность лежит в пределах допуска, задаваемого стандартом [4];

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов С.И. Применение метода фотоупругости для анализа остаточных напряжений в компакт-дисках // Прикладная механика и техническая физика. – 2004. – Т. 45. – № 3. – С. 176–180.
2. Pat. 6023332 USA. IPC<sup>c</sup> G01N 21/23; 21/21; G014/00. Device and method for measuring birefringence in an optical data carrier / Н. Bergstrom, U. Wilhelmson, L. Jonsson. – № 180261; Заявл. 14.01.99; Опубл. 08.02.2000; NCI 356-365.

- 2) характерные сдвиги полос, иногда двойные или тройные (рис. 4, б). Такие сдвиги наблюдаются на 66 % исследованных КД, причем отмечены на КД всех типов (*CD*, *CD-R*, *DVD±R*, *DVD-5*, *DVD-9*, *DVD-10*). Мы предполагаем, что появление этих сдвигов обусловлено особенностями технологии производства КД.

В данном эксперименте не удалось выявить влияние неравномерности клеевого слоя, присутствующего в структуре *DVD-9* и *DVD-10*, на интерференционные картины. Данные картины для *DVD-9* и *DVD-10* качественно аналогичны картинам для *DVD-5* и *CD*. Это позволяет сделать вывод о том, что существующая технология склейки (впрыскивание клея через специальную иглу под давлением в зазор между частями *DVD*) не оказывает существенного влияния на интерференционные картины, следовательно, и на разнотолщинность.

#### Выводы

1. Экспериментально определен диапазон изгибных деформаций исследованных в лабораторных условиях 70 образцов компакт-дисков различных типов – от 0 до 0,35 мм.
2. Причиной возникновения изгибных деформаций могут являться возникающие при напылении светоотражающего слоя поверхностные касательные напряжения. Расчетная величина нагрева диска  $\Delta T$  составляет 0,5...5 °С.
3. Обоснована справедливость рекомендаций по хранению компакт-дисков в затененных местах и недопустимости их одностороннего нагрева (например, солнечными лучами).
4. При исследовании интерференционных картин, возникающих при освещении компакт-дисков когерентным светом, получены 2 типичных их вида. Один из них (концентрические окружности) связаны с линейным возрастанием толщины диска по радиусу, второй (характерные сдвиги полос) – с особенностями технологии производства компакт-дисков. Оценка разнотолщинности диска с помощью картин первого типа дает  $\Delta t=30$  мкм, что лежит в пределах допуска по стандарту *ECMA-130*.
5. Существующая технология склейки *DVD-9* и *DVD-10* не оказывает заметного влияния на разнотолщинность компакт-дисков.

3. Алямовский А.А. Solidworks/COSMOSWorks 2006-2007. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК, 2007. – 784 с.
4. Standard *ECMA-130*. Data interchange on read-only 120 mm optical data disks (CD-ROM).

Поступила 18.02.2009 г.