

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РАДИАЛЬНО- ГРАДИЕНТНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СТРУКТУРАХ КОММУНИКАЦИОННОЙ И СИЛОВОЙ ОПТИКИ

В статье представлены соотношения интегральной фотоупругости для неразрушающей диагностики остаточных напряжений (ОН) (оптической томографии поля напряжений) в оптических стержневых структурах с радиальным распределением показателя преломления при поперечном просвечивании. Приводятся примеры реконструкции радиальных распределений ОН для граданов, лазерных стержней и заготовок для волоконных световодов с упрочняющими слоями.

Ключевые слова: интегральная фотоупругость, остаточные напряжения, оптические структуры с упрочняющими слоями.

This paper presents the relations of the generalized method of integral photoelasticity for non-destructive reconstructions of residual stresses (RS) (optical tomography of the stress field) with transverse translucence for the case of the curving probing rays in an gradient index optical rods with a radial distribution of the refractive index. The problem is solved with plane strain approximations. Examples of the reconstruction of radial distributions of RS for GRIN lenses, laser rods and preforms for optical fibers with strengthened layers are given.

Keywords: integrated photoelasticity, residual stresses, optical structures with strengthened layers.

1. Введение. Ряд оптических элементов (световоды, трансляторы изображения – граданы, активные элементы (АЭ) твердотельных лазеров имеют структуру цилиндров с радиальными градиентами химического состава, которые задаются высокотемпературным синтезом (ионообменной диффузией, парафазным осаждением и т. д.). За счет этого возникают градиенты ряда физ.-мех. свойств: показателя преломления (ПП) $n(r)$, ТКЛР, мольного объема и др.

При охлаждении изделия от температур синтеза, соответствующих вязкоупругому состоянию материала, это приводит к неоднородному сжатению «слоев» и возникновению т. н. коэффициентных ОН (r) дополнительных к закалочным, которые являются следствием релаксации термоупругих напряжений. ОН в АЭ мощных лазеров и в некоторых типах волоконных световодов специально создаются в поверхностном слое для их упрочнения. В элементах коммуникационной оптики ОН могут приводить к ухудшению передаточных характеристик из-за оптической анизотропии (ОА), а также к разрушению изделия.

Цель данной статьи – представить алгоритм и примеры реконструкции распределений ОН в указанных структурах.

2. Метод интегральной фотоупругости (оптической томографии напряжений)

Для неразрушающей диагностики в прозрачных телах используется метод интегральной фотоупругости [1], разработанный для оптически-однородных (безградиентных) структур в приближении малой ОА. Принимается, что зондирующие лучи в объекте распространяются прямолинейно и траектории обоих поляризованных лучей совпадают.

Цилиндрическая структура послойно просвечивается в поляриметре перпендикулярно оси симметрии (Z) и на множестве лучей измеряется интегральная разность фаз $\Delta_j(x_j)$ между двумя ортогонально поляризованными (по т. н. квазиглавным направлениям) колебаниями на выходе из объекта для каждого параметра просвечивания x_j . Далее решается обратная задача реконструкции локального радиального распределения $\sigma(r)$ – радиального, тангенциального и осевого компонентов ОН: $\sigma_r(r)$, $\sigma_\theta(r)$, $\sigma_z(r)$ – главных напряжений в длинном цилиндре из массива проекционных данных $\Delta_j(x_j)$ с учетом априорной информации.

Задачи реконструкции ОН в элементах с градиентом показателя преломления (ПП) приводят к необходимости обобщения классического метода с учетом искривления зондирующих лучей (рис. 1).

Эти вопросы рассмотрены в [2–4; 7]. В частности, в приближении плоского деформированного состояния показано, что при поперечном просвечивании слабо- и среднеградиентных осесимметричных структур зависимость интегральной разности фаз $\Delta^T(a)$ и осевого компонента ОН $\sigma_z(r)$ при произвольном распределении ПП $n(r)$ определяется интегральным уравнением Абелевского типа:

$$\Delta(a) = 2 \int_a^{u_R} C_0 \sigma_z \frac{dr}{du} \frac{u du}{\sqrt{u^2 - a^2}},$$

где $u = r n(r)$, $a = x n_R$ – постоянная для луча, параметр просвечивания которого равен x ; n_R – значение ПП $n(r)$ на поверхности цилиндра, C_0 – оптический коэффициент напряжений, R – радиус цилиндра.

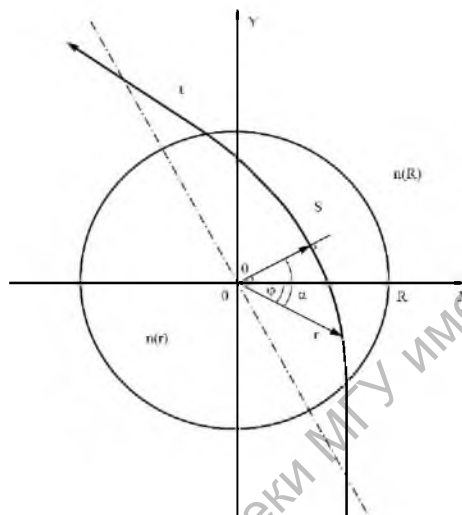


Рис. 1. Иллюстрация распространения луча при поперечном просвечивании цилиндрической структуры с плавным градиентом показателя преломления

Инверсия этого уравнения имеет вид:

$$\sigma_z(r) = -(\pi \cdot C_0)^{-1} \frac{du}{dr} \int_{u(r)}^{u^s} \frac{d\Delta^T}{da} \frac{da}{\sqrt{a^2 - u^2}},$$

где $\Delta^T(x)$ – интегральная разность фаз при поперечном просвечивании. Распределения других главных компонентов тензора напряжений – $\sigma_r(r)$ и $\sigma_\theta(r)$ определяются из решения дифференциального уравнения равновесия напряжений в цилиндре и предположения о справедливости т.н. «закона суммы» для ОН

$$\sigma_z(r) = \sigma_\theta(r) + \sigma_r(r).$$

3. Объекты исследования – структуры, где существенны отклонения просвечивающих лучей от прямолинейных траекторий: с непрерывным РПП (граданы, полученные методом высокотемпературного $T > T_g$ ионного обмена (ИО) катионов Li^+ (стекло) $\Leftrightarrow \text{Na}^+$ (расплав соли) с последую-

щим охлаждением на воздухе) с большим перепадом ПП и/или большого диаметра), а также объекты с большим градиентом напряжений со значительной рефракцией в приповерхностных слоях с дискретной или комбинированной неоднородностью ПП (упрочненные АЭ; заготовки для ОВС с упрочняющими титано-силикатными покрытиями) при известном распределении ПП).

4. Эксперимент

Исследуемый образец помещается в кювету с иммерсионной жидкостью, ПП которой согласован с ПП образца на поверхности. При исследовании длинных стержневых структур принимается, что напряжения вдали от торцов в осевом направлении постоянны (состояние плоской деформации) и просвечивание проводится в среднем сечении цилиндра.

Для измерения использовалась схема компенсации Сенармона. Ошибки определения параметра просвечивания x и разности фаз Δ (δx и $\delta \Delta$) составляли: $\delta \Delta \sim 10'$ ($3 \cdot 10^{-3}$ рад); δx определяется радиусом пятна перетяжки; $\Delta x \sim 40$ мкм. Таким образом, при $C_0 = 3,5$ Бр, $r = 0,1$ мм величина ошибки составляет $\delta \sigma \sim 0,06$ кг/мм²; при $r = 1$ мм – $\delta \sigma \sim 0,03$ кг/мм² (соответственно 0,6 и 0,3 МПа). Это позволяет сделать вывод о том, что используемая методика реконструкции позволяет получить результаты с удовлетворительной точностью.

5. Примеры реконструкции распределения остаточных напряжений в градах

Образующийся при высокотемпературном ионообменном синтезе диффузионный профиль катионов дает по сечению града непрерывный ряд стекол, соответствующий эквимольной замене щелочных окислов при сохранении нещелочного состава. ОА обусловленная ОН приводит к возникновению аберраций в градах, ухудшающих их функциональные параметры.

Ниже приводятся примеры реконструкции радиального распределения осевых ОН в градах.

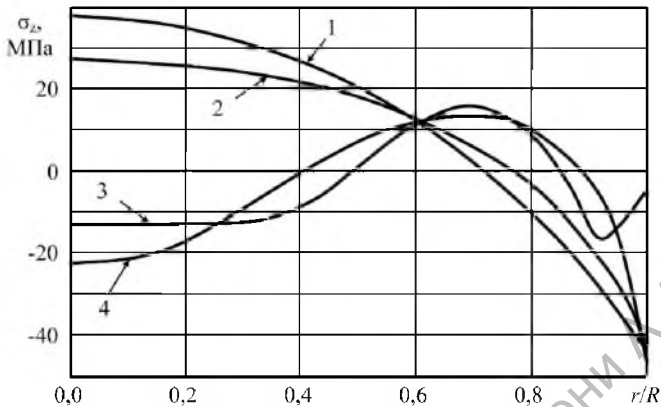


Рис. 2. Распределение осевых напряжений в градах на основе циркониево-силикатного стекла. Марки исследованных градов: 1 – ОПС-83 (4); 2 – ОПС-83 (5); 3 – ОПС-232 (232); 4 – ОПС-232 (2)

6. Упрочненные активные элементы для мощных лазеров

В АЭ из-за тепловыделения при накачке и принудительного охлаждения стержня возникают температурные градиенты и термоупругие напряжения, приводящие к термоволновым aberrациям и разрушению. Для упрочнения АЭ в приповерхностных областях формируют ионообменные стеклообразные слои, создающие упрочняющие (сжимающие) напряжения.

Ниже даются примеры ОН для атермальных неодимовых АЭ: ГЛС 1715 – ниобифосфатного с упрочняющим слоем, сформированным низкотемпературным ИО и ГЛС 817 – алюмосиликофосфатного с упрочняющим слоем, сформированным высокотемпературным ИО [6; 7].

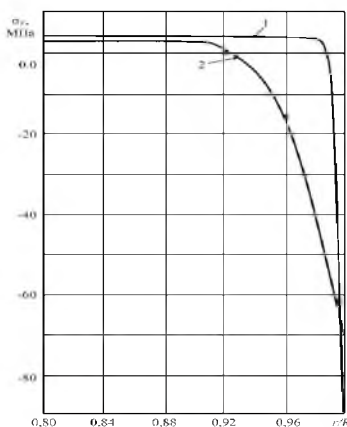


Рис. 3. Осевые напряжения в упрочненных активных элементах лазеров: 1 – 817(1); 2 – 1715(7)

7. Заготовки для упрочненных волоконных светодов

Исследованы заготовки для ОВС, упрочненные путем внешнего осаждения слоев титано-силикатного стекла (имеющего ультранизкие и отрицательные значения ТКЛР) [5; 7]. Содержание TiO_2 в покрытии: 2809/4 – 2,6 мол. %; 2813/4 – 5,8 мол. %.

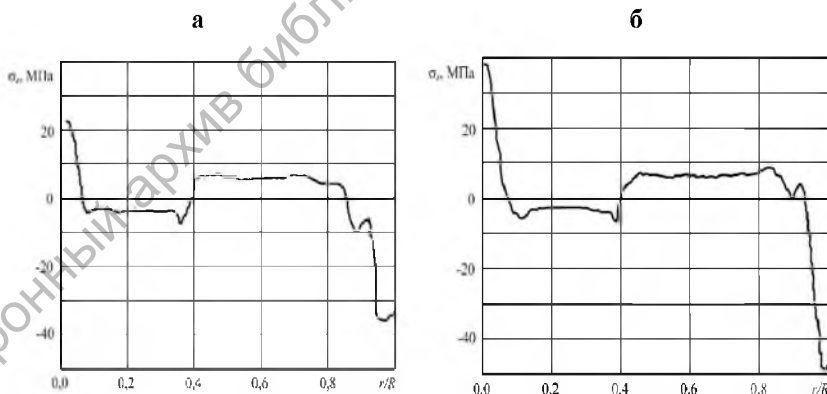


Рис. 4. Распределение напряжений σ_r в упрочненных заготовках для ОВС (а – для заготовок 2809/4; б – для 2813/4)

8. Заключение

Необходимо отметить, что реконструкция распределений ОН в приповерхностных областях связана с трудностью получения информации о $\Delta^T(x)$ вблизи контура цилиндра. Это обусловлено малой величиной оптического запаздывания и резким изменением Δ^T при просвечивании этих областей ($d\Delta^T/da = \infty$ при $x = R$); в результате $\Delta(x)$ не может быть измерена точно, когда $x \rightarrow R$). Наконец, нуждается в уточнении корректность применения в случае ОН «закона суммы», строго справедливого только для термоупругих напряжений.

Литература

1. Aben, H.K. Integrated Photoelasticity / H.K. Aben – London : McGraw-Hill international Book Company, 1979. – 203 s.
2. Каров, Д.Д. Анализ связи оптической анизотропии и остаточных напряжений в цилиндрических стержнях с градиентом показателя преломления / Д.Д. Каров, А.Б. Фадеев // Оптическое и спектральные свойства стекол : VII Всес. симп. 1989 г. : тезисы докл. – Л., 1989. – С. 205–206.
3. Пуру, А.Э. Тензорная томография остаточных напряжений / А.Э. Пуру, Д.Д. Каров // Опт. и спектр. – 2007. – Т. 103, № 4. – С. 698–703.
4. Puro, A.E. Polarization Tomography of Residual Stresses in Cylindrical Gradient-Index Lenses / A.E. Puro, D.D. Karov // Opt. and Spectr. – 2018. – V. 124, No. 5. – P. 735–740.
5. Каров, Д.Д. Моделирование и исследование остаточных напряжений в кварцевых заготовках и световодах с титано-силикатными покрытиями / Д.Д. Каров, С.Г. Кузуб, Б.Г. Юхнов, О.А. Япуржинская // VII Всес. конф. по кварцевому стеклу, 1991 г. : тезисы докл. – Л., 1991. – С. 97–99.
6. Каров, Д.Д. Остаточные напряжения в стеклянных лазерных стержнях, упрочненных ионным обменом / Д.Д. Каров, Н.В. Никоноров, Д.А. Палагин, О.А. Щавелев, В.Ю. Яковенко, В.Е. Ермаков // Лазерн. оптика – 93 : Междунар. конф. 1993 г. : тезисы докл. – СПб., 1993. – Т. 2. – С. 228–230.
7. Karov, D.D. Non-destructive express-testing of the surface stresses in strengthened optical rod elements in the presence of the refraction of the probing raus / D.D. Karov, N.Y Melnikov // Laser Optics : IX th Conference, 1998 y. : report theses. – St-Petersburg, 1998. – P. 75–76.