

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СОСТАВНЫХ ТЕЛАХ МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ

И. И. Демидова (Ленинград, СССР)

Ещё до открытия Брюстером (1816 г.) явления двуупреломления исследователей привлекала интерференционная картина в закалённых стёклах. По этой картине они могли судить о качестве стекла. Позднее остаточную интерференционную картину обнаружили и в полимерных материалах. Свойство полимерных материалов - способность к „замораживанию” деформаций и образовывать остаточное двуупреломление - широко стало использоваться фотоупругистами. Так в 1936 году Оппелем был предложен метод „замораживания” для решения как плоских, так и пространственных задач теории упругости. В 60 - 70 годы разработаны различные методы: „замораживания-размораживания” [1, 2], фиксации температурных напряжений [7, 8]. В этих методах расшифровка интерференционной картины проводится в основном на основе закона Вертгейма, либо с использованием закона Файлона-Джессопа. Вопросам обоснования выше перечисленных методов посвящён ряд работ [3—5], где используется аппарат вязкоупругости и фототермовязкоупругости, так как фактически процесс образования остаточного двуупреломления - неизоэнтальпический процесс ползучести.

Настоящая работа посвящена исследованию остаточного двуупреломления в составных телах при однородном нагревании и охлаждении. В таких телах даже при однородном температурном поле всегда имеются начальные (остаточные) напряжения, вызванные или различием физико-механических свойств, или предварительной деформацией одного из элементов. Причём эти напряжения нельзя отжечь, можно лишь изменить их величину, варьируя скорость изменения температуры. Известно также, что остаточные напряжения при эксплуатации конструкции не остаются постоянными, а влияют на возникающие напряжения, приводя к перераспределению напряжений.

Если один из элементов выполнен из полимерного материала, то конструкция более чувствительна к изменению температуры, поскольку свойства полимеров в сильной степени зависят от температуры и времени. При исследовании напряжений в прозрачных полимерных материалах таких как эпоксидная смола, поликарбонат, полиуретан, которые стали конструкционными материалами, широко

применяется поляризационно-оптический метод [1]. Этот метод может быть отнесен как к разрушающим, так и к неразрушающим методам контроля остаточных напряжений. Если можно проследить за кинетикой формирования остаточных напряжений [6], то метод фотоупругости будет неразрушающим. А если нужно оценить величину остаточного напряжения по остаточному двупреломлению, то необходимо применять разрушающий метод, т.е. модель нужно распилить на маленькие элементы.

Проследим сначала за кинетикой образования остаточных двупреломления и напряжений. На рис. 1 приведены кинетики двупреломления в составных телах при нагревании и охлаждении: 1 — для стержня, вклеенного в жесткую обойму, 2 — для кольца, вклеенного в жесткую обойму, 3 — для кольца со звездообразным внутренним контуром, вклеенного в такую же обойму. Заметим, что материал

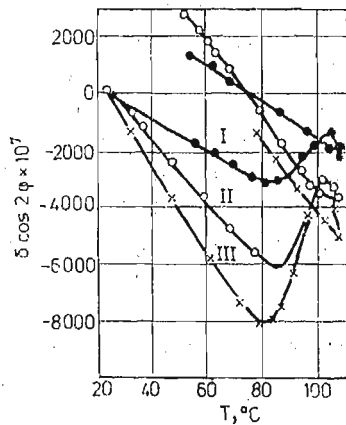


Рис. 1.

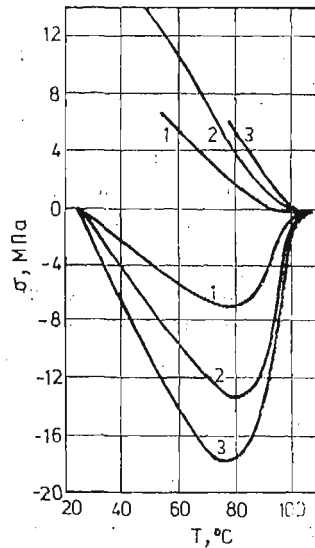


Рис. 2.

моделей и наружный радиус моделей одинаковы. Видно, что характер изменения двупреломления во всех моделях одинаков. Для определения напряжений по измеренному двупреломлению необходимо применить метод фототермовязкоупругости [6]. В основе метода лежат уравнения линейной ползучести, предложенные Диллом [9] по аналогии с реологическими. Система уравнений метода фототермовязкоупругости записывается в виде

$$\begin{cases} \sigma_{11}(x_i, t) - \sigma_{22}(x_i, t) = \bar{R}_\xi \delta(x_i, t) \cos 2\varphi(x_i, t), \\ \sigma_{12}(x_i, t) = 1/2 \bar{R}_\xi \delta(x_i, t) \sin 2\varphi(x_i, t), \\ \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{R}_\xi$  — линейный неизоотермический оптический оператор ползучести,  $\xi$  — приведенное время,  $\sigma_{ij}$  — тензор напряжений,  $t$  — время,  $T$  — температура. Для обоснования реологического и оптических уравнений вязкоупругости был разработан комплекс экспериментов, уравнения (1) были проверены при постоянных и переменных нагрузках и температурах, рассмотрены вопросы численной реализации метода, получены все необходимые исходные характеристики материала. Показана высокая точность этих уравнений. Кинетика напряжений приведена на рис. 2. И здесь кинетики напряжений подобны для всех моделей, поскольку существует связь между напряжениями в составных телах и напряжением в зацементированном стержне [6]

$$\sigma_{ij}(x, t) = \bar{a}_{ij}\sigma, \quad (2)$$

где  $\bar{a}_{ij}$  — тензор-оператор, функция  $a_{ij}$ , определяющая этот оператор зависит от геометрии модели, коэффициента Пуассона. Применение зависимости (2) значительно сокращает объём работы при решении задач со сложной геометрией, так как в упругих состояниях (в стеклообразном и высокоэластическом) можно легко найти функции, определяющие оператор  $\bar{a}_{ij}$ , используя обычный закон Вертгейма, а кинетику напряжений в стержне  $\sigma$  можно или вычислить на ЭВМ, или найти экспериментально.

Таким образом мы проследили за образованием остаточных напряжений. Если такую модель нагрузить или нагреть, то остаточные напряжения будут влиять на последующие процессы. В методе фотоупругости при решении упругих задач обычно начальное двупреломление вычитают из двупреломления, измеренного в нагруженных моделях [1]. При этом неявно предполагается, что начальное двупреломление не будет изменяться в течение эксперимента. Такое допущение, очевидно, не всегда является приемлемым. Например, в изотермических опытах при повышенных температурах начальное двупреломление и напряжения будут заметно релаксировать [6]. Тем более необходимо учитывать изменение начального двупреломления и напряжений в изотермических опытах. Методом фототермовязкоупругости изменение начального двупреломления учитывается автоматически, а именно, по измеренному двупреломлению с помощью численного решения уравнения (1) переходят к напряжениям. Так, если модели 1 - 3 снова нагреть, то кинетика двупреломления и напряжений будет практически такой же, как и при первом охлаждении, если скорости изменения температуры одинаковые [6]. Такой характер изменения двупреломления и напряжений связаны с тем, что начальные напряжения и двупреломления не остаются постоянными при неизоотермическом процессе — они релаксируют. Заметим, что в рассмотренном случае остаточные двупреломление и напряжения были положительными. Если начальные двупреломление и напряжения отрицательные, как часто бывает при склейке модели, например, трёхслойной, у которой полимерное кольцо жёстко соединено с элементами из различных металлов (модель 4), то кинетика  $\delta(T)$  иная (см. рис. 3, кривая 1). Здесь также происходит релаксация. Если бы начального двупреломления не было, то характер был бы таким же, как и на рис. 3, кривая 2. С учетом релаксации начального двупреломления кинетика  $\delta(T)$  будет (рис. 3, кривая 3). Интересно отметить, что уровень двупреломления для модели 4 значительно ниже, чем для

модели 1 - 3. Малое дупреломление вообще характерно для задач, в которых граничные условия заданы в перемещениях. В данном случае теоретическое решение для модели 4 можно представить в виде

$$\sigma_r = A + B \frac{a^2}{r^2}, \quad \sigma_\theta = A - B \frac{a^2}{r^2},$$

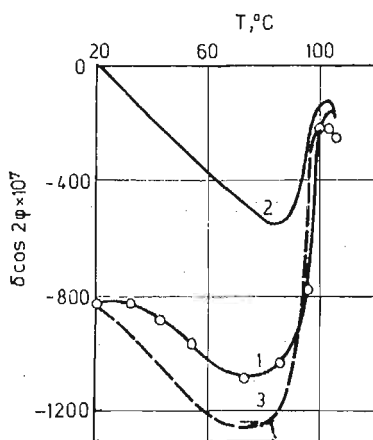


Рис. 3.

где  $A$  и  $B$ -функции модуля Юнга, коэффициента Пуассона полимерного материала, геометрии модели, разности тепловых деформаций. Дупреломление для этой задачи будет

$$\delta = \bar{C}_\xi (\sigma_r - \sigma_\theta) = 2 \frac{a^2}{r^2} \bar{C}_\xi B.$$

Отметим, что величина  $A \gg B$ . Если полимерное кольцо будет соединено с металлическими элементами, изготовленными из одного и того же материала, то  $B \equiv 0$  и дупреломление  $\delta \equiv 0$ . Отсутствие дупреломления может привести к ошибочному выводу о том, что тело свободно от напряжений. Однако достаточно просверлить отверстие, чтобы убедиться в том, что напряжения имеются.

Таким образом от неразрушающего метода контроля образования и изменения остаточного дупреломления мы перешли к необходимости применения методов с разрушением модели. Вообще, если есть в моделях остаточное дупреломление, а кинетика дупреломления неизвестна, то расшифровать интерференционную картину полос не всегда просто, поскольку количество полос в модели не всегда определяет уровень напряжений в моделях.

На рис. 4 приведены эпюры остаточных дупреломлений для модели 4 и для составных моделей, имеющих включения в центре полимерной матрицы, изготовленной в виде кольца (модели 5, 6). Во всех моделях полимерный элемент выполнен из эпоксидной смолы. Видно, что в модели 4 дупреломление незначительно, в моделях 5 и 6 количество полос одинаковое, отличается только параметр изоклины. Для расшифровки остаточного дупреломления и определения истинных напряжений нужно выявить причины образования дупреломления. Для этого выпишем

сначала из полимерной матрицы 5 и 6 небольшие элементы. После измерения дву-  
 преломления оказалось, что в модели 5 произошло изменение дву-  
 преломления (рис. 4 а, кривая 5.2), характерное для составных моделей, выполненных из раз-  
 личных материалов. А в модели 6 дву-  
 преломление осталось практически без изме-  
 нений, т. е. также как и в задачах о посадке с натягом или в методе „заморажи-

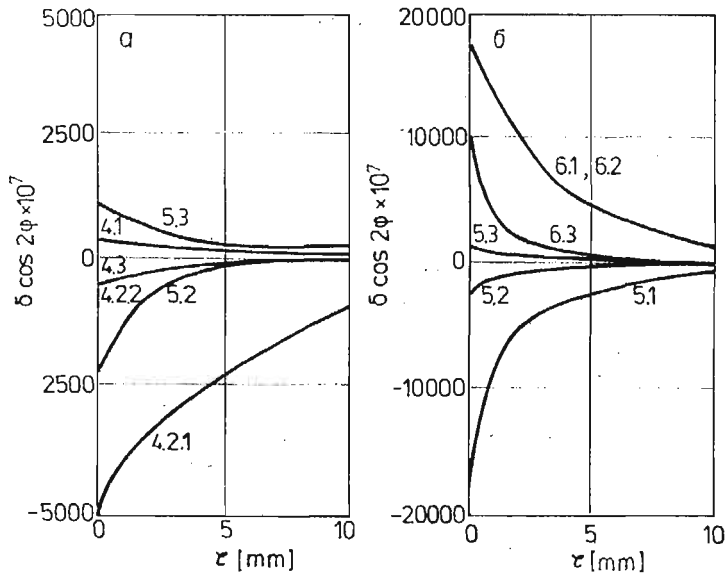


Рис. 4.

вания-размораживания”’. Следовательно, в этой модели источником образования  
 дву-  
 преломления была несовместность, неизменяющаяся в процессе охлаждения,  
 материалы включений и матрицы можно считать одинаковыми по физико-меха-  
 ническим свойствам.

Для трёхслойной модели 4 отделим сначала наружное кольцо. Из рис. 4а видно,  
 что дву-  
 преломление увеличилось и стало противоположного знака (кривая 4.2.1).  
 Затем выпилем, как и для моделей 5 и 6, элемент. Дву-  
 преломление в нем уменьши-  
 лось (рис. 4 а, кривая 4.2.1).

В результате отжига частей моделей 5 и 6 дву-  
 преломление полностью не исче-  
 зает. Кривые остаточного дву-  
 преломления обозначены на рис. 4 соответственно  
 5.3, 6.3. Заметим, что для модели 5 остаточное дву-  
 преломление противоположного  
 знака. Дву-  
 преломления в модели 4 после отжига практически нет.

Из приведенного исследования видно, что для определения остаточных напря-  
 жений нужно найти разность ординат соответствующих кривых  $i. 1$  и  $i. 3$  а затем  
 для моделей 4 и 5 эту величину разделить на коэффициент оптической чувстви-  
 тельности при температуре  $T_0$ . А для модели 6 эту разность нужно разделить на  
 коэффициент оптической чувствительности при температуре высокоэластического  
 состояния. Разделение напряжений на составляющие проводится также, как и в ме-  
 тоде фотоупругости. Для исследованных моделей получены следующие величины

радиальных и окружных напряжений на контуре включений:  $\sigma_{r3} = -11$  МПа,  $\sigma_{\theta5} = 14,5$  МПа,  $\sigma_{r6} = 0,37$  МПа,  $\sigma_{r4} = 15$  МПа,  $\sigma_{\theta4} = 30$  МПа.

Следовательно, несмотря на то, что количество интерференционных полос для моделей 5 и 6 было одинаковое, уровень напряжений в составной модели 5 значительно выше, чем в модели 6.

#### Литература

1. А. Я. Александров, М. Х. Ахметзянов, *Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела*. М. Наука, с. 576, 1973.
2. Г. С. Варданын, И. И. Пригоровский, *Моделирование термоупругих напряжений поляризационно-оптическим методом*. Изв. АН СССР. Мех. маш., № 4, с. 146 - 149, 1962.
3. Е. И. Эдельштейн, *О „замораживании“ деформации в методе фотоупругости*. Вестник ЛГУ, № 7, с. 118 - 125, 1968.
4. И. И. Бугаков, И. И. Демидова, *О способе „фиксации“ двууплощения в полимерных элементах составных моделей*. — Исследования по упругости и пластичности. Изд-во Ленинградского ун-та, вып. 12, с. 97 - 107, 1978.
5. И. И. Бугаков, И. И. Демидова, *О некоторых способах „фиксации“ двууплощения в полимерных телах*. — Сб.: Поляризац. — оптический метод и его приложение к исследованию тепловых напряжений. Киев, „Наукова Думка“, с. 34 - 40, 1976.
6. И. И. Демидова, *Об однородном нагреве и охлаждении полимерных тел, жестко закрепленных по части поверхности*. — Сб.: Поляризационно-оптический метод и его приложение к исследованию тепловых напряжений. Киев, Наукова Думка, с. 71 - 76, 1976.
7. R. S. SAMPTON, *A three dimensional photoelastic method for analysis of differential contraction stresses*. — Exp. Mech., v. 3, No 10, p. 225 - 237, 1963.
8. E. HOSP, *Experimentelle Bestimmung von Wärmespannungen in Bauteile auf spannungsoptischen Wege*. Bautechnik, N. 11, 1960.
9. E. H. DILL, *Photoviscoelasticity*. In.: Mech. Chem. Solids Propellant. Pergamon Press. N.Y.a.o., p 443 - 461, 1967.

#### Streszczenie

#### BADANIA METODAMI ELASTOOPTYCZNYMI NAPRĘŻEŃ RESZTKOWYCH W CIAŁACH ZŁOŻONYCH

W pracy rozpatrzono zagadnienia naprężeń cieplnych w ciałach złożonych w przypadku jednorodnego nagrzewania lub ochładzania. Pokazano, że metodą fototermolepkosprężystości można wyznaczać naprężenia przy dowolnej zmianie temperatury i można również uwzględnić naprężenia wstępne. Podano przykłady, pokazujące, że poziom dwójłomności nie zawsze wyznacza poziom naprężeń. Zaproponowano doświadczalną metodę badania resztkowej dwójłomności.

#### Summary

#### INVESTIGATION OF THE RESIDUAL STRESSES IN COMPLEX BODIES BY PHOTOELASTIC METHODS

In the paper the thermal stress in complex bodies have been considered for homogeneous heating or cooling. It has been shown that the stresses at arbitrary change of temperature, including also initial stresses, can be determined by means of the photothermoviscoelasticity method. It results from examples that the level of birefringence does not always determine the stress level. An experimental method has been proposed for the residual birefringence investigation.

Praca została złożona w Redakcji dnia 20 kwietnia 1985 roku