

# МЕТОД ФОТОУПРУГОСТИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ МАИ

Анатолий Семёнович Демидов, д.т.н., профессор кафедры конструкций и проектирования двигателей, Московский авиационный институт МАИ (национальный исследовательский университет),

*Метод получения плоских картин напряжений внутри тел сложной формы – в том числе, на начальных этапах проектирования, до изготовления детали из металла – успешно практикуется при просвечивании на специальных установках поляризованным светом моделей деталей, сделанных из оптически прозрачных материалов.*

*A method of obtaining flat patterns of stress inside bodies of complex shape – including, at the initial design stages, to fabrication details from metal is successfully practiced when scanning for special installations polarized light of models of components, made from optically transparent materials.*

**Ключевые слова:** нагрузки, напряжения, поляризованный свет, фотоупругость.  
**Keywords:** loads, strength, polarized light, photoelasticity.

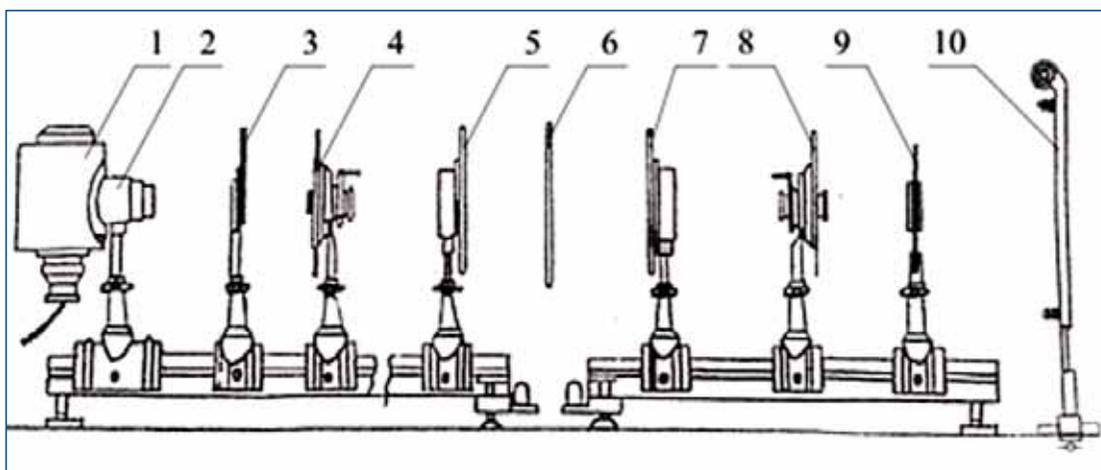


Рис. 1 Схема установки ППУ-7 1 - источник света; 2 - конденсор; 3 - светофильтр; 4 - поляризатор с пластинкой четверть волны; 5 - рабочая линза; 6 - исследуемая модель; 7 - ответная рабочая линза; 8 - анализатор с пластинкой четверть волны; 9 - проекционный объектив; 10 - экран.

Этот метод для изучения прочности конструктивных элементов можно назвать в высшей степени наглядным и красивым. Многие задачи по исследованию плосконапряженного состояния решаются им достаточно просто. В основе метода лежит эффект двойного лучепреломления [1]. Такой эффект свойственен некоторым природным телам, а также возникает при просвечивании поляризованным светом ряда механически нагруженных искусственных материалов. Схема проекционно-поляризационной установки ППУ-7 показана на рис.1. Если в ее нагрузочное устройство поместить модель из оптически активного материала, то на экране получается картина интерференционных полос, которая должна быть расшифрована.

Закон фотоупругости при плоском напряженном состоянии:

$$R_t = C \times t \times (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1)$$

где  $R_t$  - относительная линейная разность хода, вызванная временным двойным лучепреломлением;

$C$  - постоянная, называемая оптическим коэффициентом напряжения;

$t$  - толщина модели;

$\sigma_1, \sigma_2$  - главные напряжения.

На рис. 2 для примера показана картина полос, которую можно увидеть на экране установки ППУ-7, если в нагрузочное устройство разместить четырехопорную балку. На

участке чистого изгиба в ее средней части напряжение  $\sigma_2 = 0$ , а  $\sigma_{1max}$  легко определяется, поскольку можно задать силы  $P$  и размеры балки. Темная (нулевая) полоса в середине картины полос соответствует положению нейтральной линии. Ведя отсчет от нее и двигаясь в поперечном направлении, определяем, что на краю балки порядок полосы  $n = 5$ , откуда для выбранной толщины модели можно определить так называемую цену полосы

$$\tau_0 = \sigma_{1max}/5, \quad (2)$$

Более сложной оказывается задача разделения главных напряжений, когда оба они отличаются от нуля. Для ее решения используется картина полос в сочетании с картиной изоклин, метод "Рапид" и другие методы [1]. Изоклина представляет собой геометрическое место точек, направления главных напряжений в которых параллельны. Картины изоклин могут быть получены с помощью работы с поляризатором и анализа-

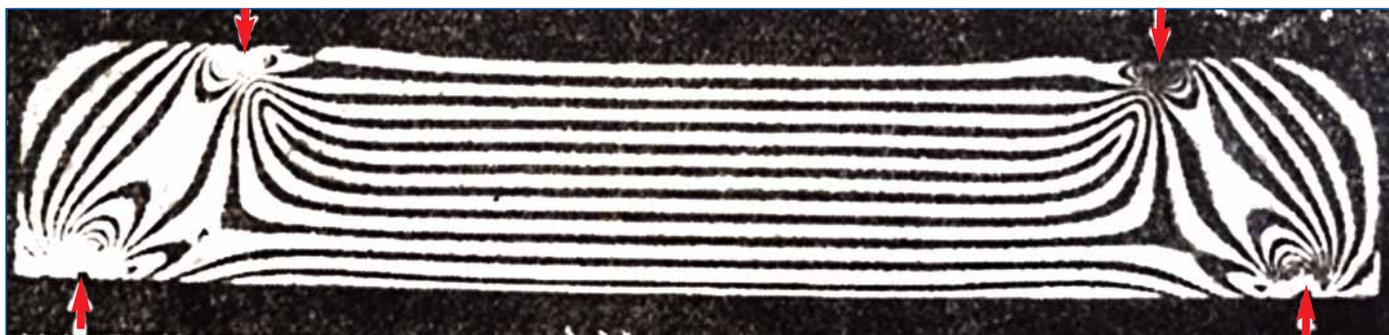


Рис. 2 Картина полос 4-опорной балки под нагрузкой на экране ППУ-7

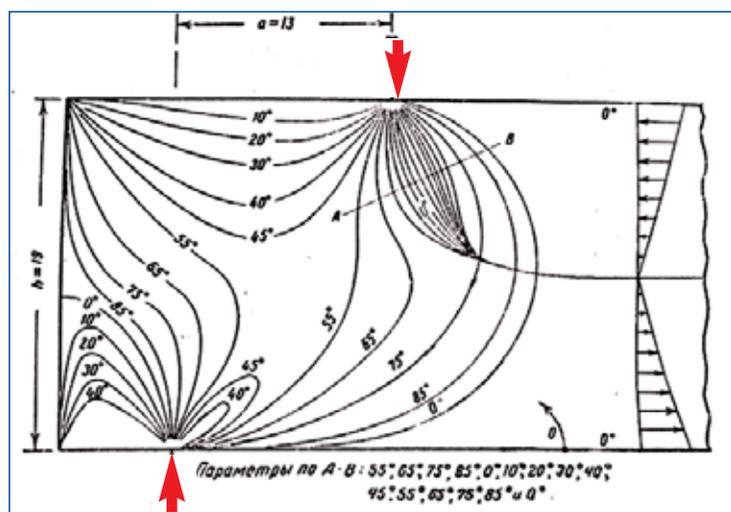


Рис. 3 Изоклины для конца балки, картина полос которой показана на рис. 2 [1]

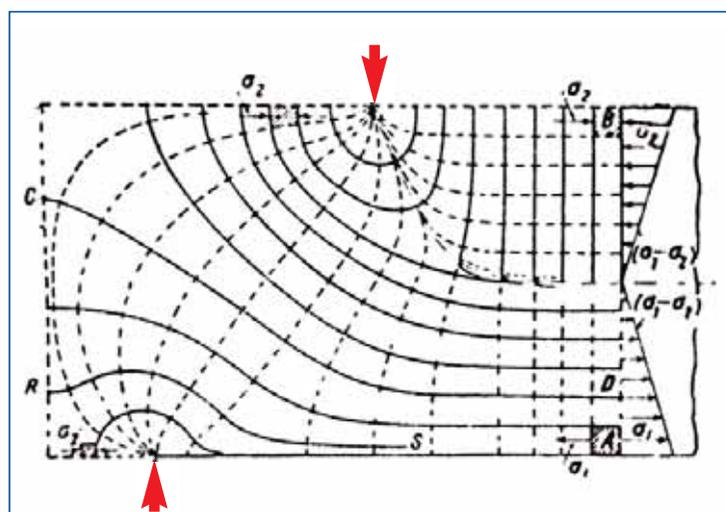


Рис. 4 Изостаты (линии главных напряжений) конца балки, построенные по картине изоклин на рис.3 [1]

тором. Поляризатор представляет собой устройство для создания потока поляризованного света в заранее заданной плоскости, а с помощью анализатора может быть получена смешанная картина полос и изоклин. Для исключения изоклин из нее в световой поток для сдвига фаз вводятся так называемые пластинки четверть волны (рис.1). В свою очередь, почти чистая картина изоклин получается при использовании модели из материала со слабой оптической чувствительностью, например, плексигласа. Изоклины для конца балки (общая картина полос приведена на рис.2) показаны на рис.3 и на их основе построены траектории главных напряжений (рис.4). Нижние волокна балки растянуты, а верхние сжаты. Таким образом, вдоль нижней части балки направлены траектории напряжений 1 (сплошные линии), а вдоль верхней - траектории 2 (штриховые). За пределами участка чистого изгиба траектории меняют свое направление, но обе системы кривых в соответствии с определением остаются взаимноортогональными.

При постановке опытов на модели с размерами и усилиями, отличающимися от таковых в натуральной детали, необходимо использовать формулу

$$\sigma_d = \sigma_m \times d_m \times t_m \times P/d \times t \times P_m, \quad (3)$$

где  $\sigma, \sigma_m$  - напряжения в детали и модели соответственно,  $d, d_m$  - толщина детали и модели соответственно,  $P$  и  $P_m$  - действующие на них нагрузки

В Московском авиационном институте метод фотоупругос-

ти применялся в лабораториях нескольких кафедр. На кафедре 203 организатором лаборатории в конце 50-х годов был инженер В.Б. Горлов. Под его руководством при консультациях с д.т.н. Н.И. Пригоровским из Института машиноведения АН СССР была создана группа сотрудников (Л.П. Морозова, С.Ф. Максимова, И.Г. Соколовская, и др.), в которой с высокой точностью изготавливались модели из материала на основе эпоксидной смолы ЭД-6М. Была приобретена, установлена и отлажена проекционно-поляризационная установка ППУ-7, на экспериментально-опытном заводе МАИ изготовлен термостат. В 1963 году В.Б. Горлов успешно защитил кандидатскую диссертацию по посвященную замковым соединениям лопаток компрессоров воздушно-реактивных двигателей [2]. Напряжения на вращающихся деталях из отвержденной смолы исследовались с помощью скоростной киносъемки и стробоскопа при 4000 оборотах в минуту на специально созданном варианте поляризационной установки ДППУ-2А (рис. 5). Для решения объемных задач прочности путем так называемого "замораживания" напряжений применялся термостат. В настоящее время на кафедре 203 поляризационная установка ППУ-7 используется только в учебном процессе, но намечены более широкие задачи. В конце 60-х годов работы методом фотоупругости проводились также на кафедре 104. В частности, остаточные напряжения в конструкциях исследовались аспирантом Г.А. Молодцовым. Также большой интерес к этому методу был проявлен на кафедре 603. Полноценные исследования на приобретенной аппаратуре помешали наладить неурядицы перестроенного периода, но такие возможности по-прежнему существуют. В тот же период времени лабораторную работу по фотоупругости пытались поставить на кафедре физики, но пока в некоторые учебные планы входит только работа по изучению отражения и преломления света в поляризаторе из стопы стеклянных пластинок.

□

Литература

1. М.М. Фрохт Фотоупругость, т.1. - М.-Л.: ГИТТЛ, 1948. - 432 с.  
 2. В.Б. Горлов Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук "Теоретическое и экспериментальное исследование замкового соединения типа "ласточкин хвост", 1963.

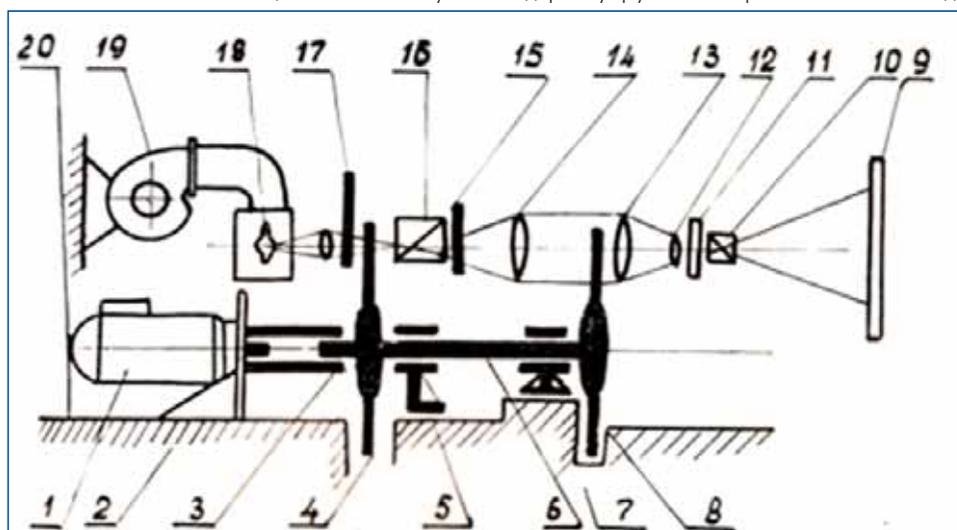


Рис. 5. Кинематическая схема ДППУ-2А [2]: 1 - э/мотор; 2 - кронштейн; 3 - гибкая связь; 4 - диск стробоскопа; 5 - опора; 6 - вал; 7 - опора; 8 - исследуемая модель; 9 - экран; 10 - анализатор; 11 - пластинка четверть волны; 12 - проекционный объектив; 13, 14 - рабочие линзы; 15 - пластинка четверть волны; 16 - поляризатор; 17 - щелевой отсекатель; 18 - осветитель с конденсором; 19 - вентилятор; 20 - чугунная станина.