

УДК 539.3

© 2000 г. Р.В. Гольдштейн, В.М. Козинцев, А.Л. Попов,
Г.Н. Чернышев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ОТСЛОЕНИЙ ТОНКИХ ПОКРЫТИЙ

Представлены теоретическая и экспериментальная методики диагностики отслоений тонких покрытий, нанесенных на упругое тело-подложку. В теоретической методике использована балочная модель тела-подложки. Отслоение покрытия моделируется полуокружностью малого радиуса над центральной частью балки. Изгибающая нагрузка моделируется нормальной сосредоточенной силой, приложенной в середине пролета балки. Экспериментальная методика основана на создании изгибного напряженно-деформированного состояния в теле с регистрацией возникающих перемещений тела и покрытия при помощи лазерно-голографической интерферометрии методами реального времени и двух экспозиций [1, 2]. При действии нагрузки на балку со стороны, обратной покрытию, перемещение точек отслоенной части покрытия происходит как жесткое целое в направлении действия силы в сочетании с продольными перемещениями вследствие поворота поперечных сечений балки. Это приводит к разности хода в перемещениях участков балки с плотно и неплотно прилегающим покрытием. При голографическом сопоставлении балки в разных состояниях эта разность хода выявляется в виде локальных нарушений регулярности системы полос интерферограммы.

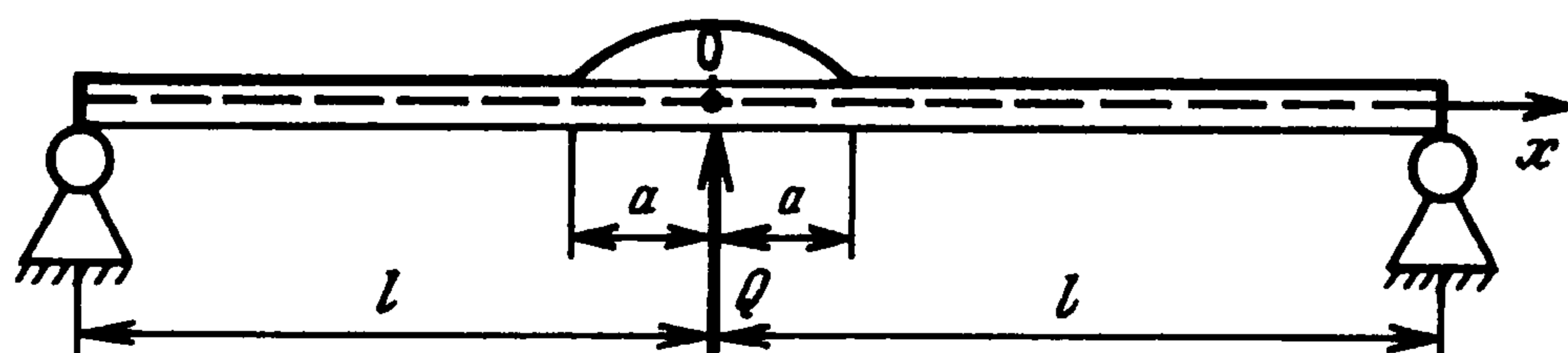
1. Балочная модель для контроля за отслоением покрытия. Рассмотрим балку длины $2l$, шарнирно опертую по краям (фиг. 1). Сверху балки нанесено тонкое покрытие, в центральной части которого имеется малое отслоение в виде полуокружности радиуса a ($a \ll l$). Считая, что покрытие не влияет на жесткостные характеристики балки, найдем форму прогиба балки с покрытием при действии на нее нормальной сосредоточенной силы $Q\delta(x)$, приложенной в середине балки, как показано на фиг. 1.

Уравнение изгиба балки относительно функции прогиба $W(x)$ имеет вид

$$EJW''''(x) = Q\delta(x) \quad (1.1)$$

где EJ – изгибная жесткость, x – продольная координата с началом в середине балки [3]. Непосредственным интегрированием получаем

$$W(x) = \frac{Q}{12EJ} x^2 |x| + \sum_{n=0}^3 C_n x^n \quad (1.2)$$



Фиг. 1

(C_n – постоянные интегрирования). В силу постановки модельной задачи, ее решение должно быть симметрично относительно середины балки. Следовательно, $C_1 = C_3 = 0$. Остальные постоянные находятся из граничных условий

$$W(l) = 0, \quad W'''(l) = 0$$

В результате форма прогиба балки примет вид

$$W(x) = \frac{Q}{12EJ} (x^2 |x| - 3lx^2 + 2l^3) \quad (1.3)$$

При изгибе балки точки отслоенного участка покрытия перемещаются в двух направлениях.

Во-первых, они перемещаются как жесткое целое в направлении прогиба балки. Величина этого смещения равна упругому смещению концов отслоенного участка, т.е. $W(a)$ (считается, что изгиб балки не приводит к дальнейшему отслоению покрытия). Отнеся координату x к длине балки, получим

$$W(a) = \frac{Ql^3}{12EJ} (\xi^3 - 3\xi^2 + 2), \quad \xi = \frac{a}{l} \quad (1.4)$$

Если бы покрытие прилегало к балке по всей длине, то перемещения его точек на участке $a < x < a$ отличались бы от (1.4). В центральной точке ($x = 0$) значение перемещения балки с покрытием было бы равно $Ql^3/(6EJ)$. Следовательно, разность

$$\delta W = W(0) - W(a) \quad (1.5)$$

может служить одним из индикаторов отслоения покрытия. Подставляя в (1.5) выражение (1.4), получим в первом приближении

$$\delta W = Ql^3\xi^3/(4EJ) \quad (1.6)$$

Во-вторых, перемещение точек отслоения покрытия также обусловлено продольным смещением концов отслоения вследствие поворота поперечных сечений балки при изгибе. Это приводит к преобразованию формы отслоения от полуокружности к вытянутому вдоль балки полуэллипсу с уменьшением расстояния между балкой и точками отслоения покрытия.

Математически такое сближение точек отслоения покрытия и балки можно оценить через изменение кривизны дуги отслоения. Задавая кривизну дуги оси балки известным выражением

$$\rho^{-1} \approx W''(x) \quad (1.7)$$

получим для середины балки значение

$$\rho^{-1} \approx Ql/(2EJ) \quad (1.8)$$

При $a \ll l$ можно считать, что кривизна изогнутой оси балки в точке $x = a$ такая же, что и в точке $x = 0$, т.е. выражается формулой (1.8).

Для растянутых слоев балки с покрытием необходимо также учесть изменение радиуса кривизны по толщине этих слоев. Радиус кривизны внешнего слоя балки будет $\rho_1 = \rho + h$, где h – полутолщина балки. С учетом этого и исходя из неизменности длины дуги отслоения, рассчитываемой по формуле

$$s = 2 \int_0^a \left[1 + \left(\frac{dW}{dx} \right)^2 \right]^{1/2} dx$$

до и после деформации балки, приходим к значению продольного смещения концов

отслоения

$$\delta a = \frac{Qa}{2EJ} \left(1 - \frac{a}{2}\right) \left(h + \frac{2EJ}{Ql}\right) - a \quad (1.9)$$

Если аппроксимировать полуэллипсом овал, получающийся при раздвигании концов полуокружности, то его малая полуось будет равна $a - \delta a$. В первом приближении уменьшение высоты отслоения равно $Qalh/(2EJ)$.

Объединяя полученное значение с величиной (1.6) и относя их к максимальному прогибу оси балки, приходим к окончательной формуле изменения высоты отслоения в результате изгиба по сравнению с недеформированным состоянием

$$\frac{\delta a}{W(0)} = \frac{3}{2} \left(\frac{a}{l}\right)^2 \left(1 + \frac{2h}{a}\right) \quad (1.10)$$

При голографическом методе измерения нормальных перемещений балки изменение высоты отслоения выявляется в виде локальных нарушений регулярности системы полос интерферограммы, а именно, возникновения на картине уровней прогиба балки участков плато и сгущения полос. Формула (1.11) служит для оценки требуемой в эксперименте нагрузки на балку, которая при заданных размерах балки и предполагаемом радиусе отслоения обеспечивает разрешение полос интерферометрической картины, необходимое для идентификации отслоения.

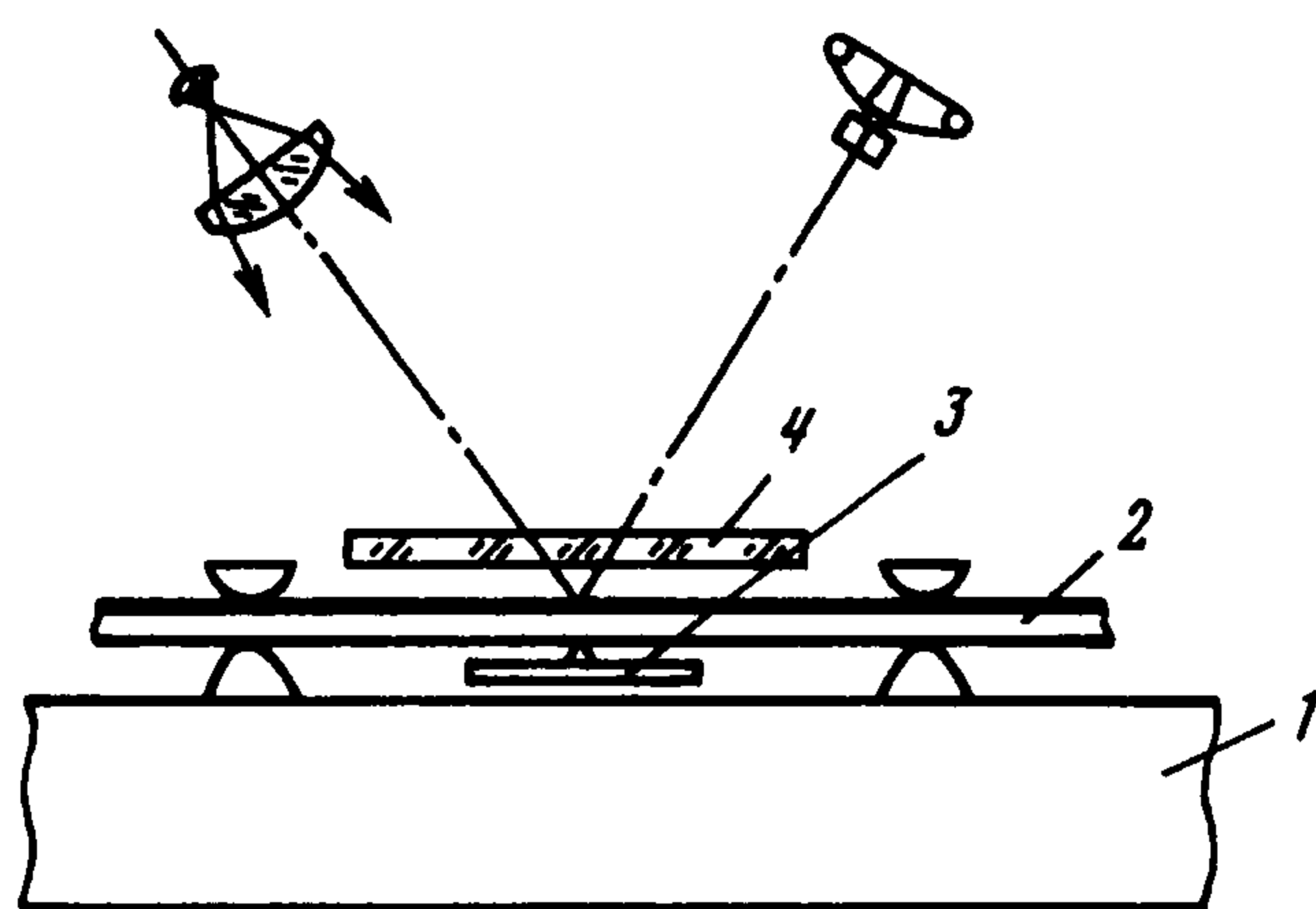
2. Лазерно-интерферометрическая методика определения отслоений при изгибе тонких тел с покрытиями. Принцип лазерно-интерферометрической регистрации перемещений поверхности тела состоит в следующем: сравниваются голограммы объекта, записанные в различное время при разных состояниях объекта (метод двух экспозиций), либо сравниваются голограмма объекта до воздействия и реальный объект после воздействия (метод реального времени). Перемещения поверхности объекта, происшедшие в результате воздействия, выявляются в виде интерферограммы – системы линий равных перемещений [1, 2].

Для регистрации отслоений при изгибе тонких тел с покрытиями была применена оптическая схема во встречных пучках, на основе которой разработана экспериментальная установка для голографической записи нормальной компоненты вектора перемещения поверхности тела [4, 5].

Исследования проводились на алюминиевой пластине прямоугольной формы $150 \times 25 \times 1,3$ мм, с которой, при изгибе по большей стороне, хорошо согласовывалась теоретическая балочная модель. В качестве покрытия на одну из сторон пластины была приклеена алюминиевая фольга толщиной 0,015 мм. Соединение осуществлялось посредством приклеивания. Толщина клеевого слоя 0,01 ... 0,02 мм. В процессе нанесения покрытия искусственно создавались дефекты типа малых отслоений порядка нескольких толщин покрытия (в этих местах убиралась клеевая прослойка).

Эксперименты проводились при условиях жесткого защемления концов длинной стороны пластины. Нагружение осуществлялось рычажным механизмом, обеспечивающим приложение нагрузки, близкой к сосредоточенной (как на фиг. 1), в средней части пластины со стороны, противоположной покрытию. Измерительная установка состояла из стальной плиты с сеткой резьбовых отверстий, к которым крепились элементы оптики, опоры пластины и нагрузочное устройство. Величина нагрузки менялась в пределах от 20 до 150 Г.

Запись голограммы проводилась во встречных пучках в соответствии с приведенной оптической схемой, фиг. 2 [1, 4]: 1 – опорная плита, 2 – алюминиевая пластина с покрытием, 3 – элемент нагрузочного устройства, 4 – фотопластинка. Коллимированный луч лазера при прохождении через фотопластинку является опорным. Отраженный от объекта на фотопластинку луч является предметным. Направление освещения на фиг. 2 показано стрелками, а наблюдения – символическим изображением фотокамеры.



Фиг. 2

Эксперимент выполнялся в следующей последовательности. Образец закреплялся на установке, где имелись наклеенные опорные шарики и ограничители положения голографических фотопластинок. На фотопластинках с помощью расплавленной смеси канифоли и воска приклеивалось по одному стальному кольцевому ловителю шариковой опоры. Это обеспечивало повторную установку фотопластинки с голограммой на прежнее место. После юстировки оптической схемы и надежной фиксации положения всех неподвижных элементов, подготовленные фотопластинки поочередно подвергались первому экспонированию

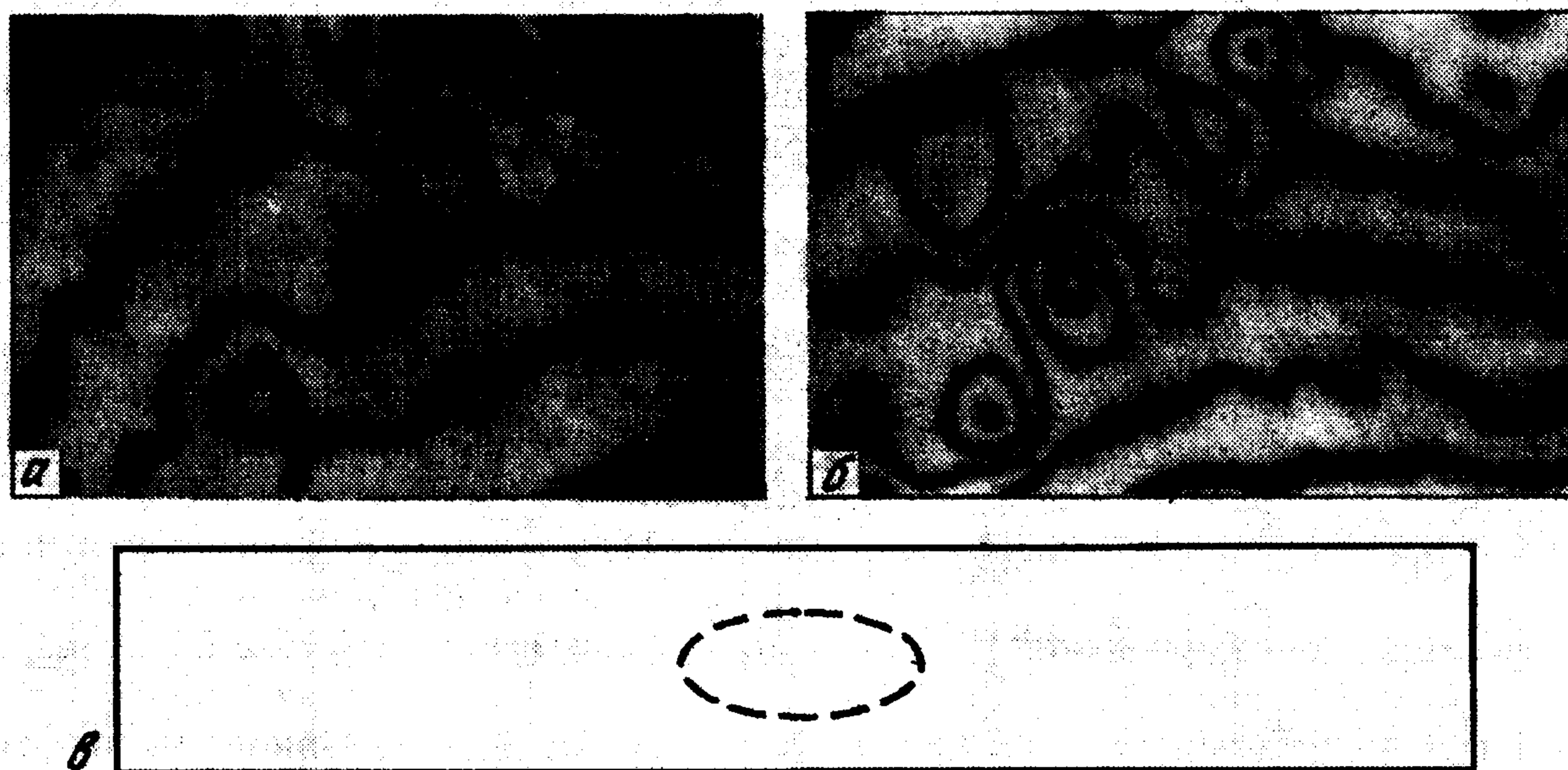
для регистрации невозмущенного состояния поверхности образца. Одна из проэкспонированных пластин сразу же проявлялась и, установленная после промывки и высушивания в исходное положение, использовалась как опорная голограмма для наблюдения в реальном времени. На остальных фотопластинках во время второй экспозиции регистрировались возмущенные состояния поверхности образца, т.е. записывались двухэкспозиционные голограммы. Регистрация нормальных перемещений, возникающих при приложении нагрузки к испытываемому образцу, осуществлялась по результатам наблюдения двухэкспозиционных голограмм.

Для экспериментального установления связей нагрузки с характером и местом положения отслоений покрытия и видом возникающих интерференционных полос нужно было обеспечить возможность оперативного наблюдения за ходом изменения интерференционной картины в процессе нагружения. Такое наблюдение проводилось в реальном времени с помощью опорной голограммы и позволяло выбирать моменты времени для выполнения второго экспонирования. В результате на одной и той же фотопластинке последовательно записывались две голограммы: для объекта в исходном состоянии, и после воздействия нагрузки. Одновременно восстановление обоих изображений при освещении проявленной фотопластинки опорным пучком света позволяло наблюдать и фотографировать исследуемый объект, покрытый сеткой интерференционных полос (ИП), возникающих в результате интерференции световых волн, формирующих изображения объекта в исходном и возмущенном состояниях. Каждая ИП определяет геометрическое место точек с равными значениями проекции вектора перемещения на биссектрису угла между направлениями освещения и наблюдения объекта.

При появлении на поверхности образца, наблюдаемого через опорную голограмму, ИП, связанных с перемещениями от нагружения, опорная голограмма убиралась и устанавливалась другая фотопластинка, также проэкспонированная на объекте в его исходном состоянии, но непроявленная. Для нее проводилась вторая экспозиция. Таким образом, фиксировалась картина ИП для данной нагрузки. После возвращения на место опорной голограммы возобновлялось наблюдение за ходом изменения интерферограммы при увеличении нагрузки до следующего шага регистрации.

По завершении последнего этапа нагружения, обеспечивающего достаточное количество ИП на интерферометрической картине, полученные голограммы поочередно устанавливались в положение, воспроизводящее их размещение при съемке. Восстанавливаемое ими изображение регистрировалось фотокамерой.

На фиг. 3, а, б представлены картины интерференционных полос на поверхности пластины в области, содержащей отслоения покрытия, в двух последовательных стадиях нагружения пластины. Интерферограммы состоят из параллельных полос, обусловленных деформацией образца при изгибе, и кольцевых полос в окрестностях локальных отслоений. Расположение кольцевых полос совпадает с заданными дефектами. Ясно видны и соотношения между величинами отслоений по нормали к поверхности пластины, характеризующиеся числом кольцевых полос: одни из них проявляются двумя-тремя полосами, другие – одной. На фиг. 3, в штриховой линией показано расположение сфотографированного участка поверхности пластины с покрытием (вид сверху).



Фиг. 3

Другая характеристика отслоения – его линейные размеры вдоль поверхности пластины. Они приблизительно совпадают с размерами наибольшей кольцевой полосы интерферограммы, связанной с данным дефектом. С увеличением нагрузки (фиг. 3, б) возрастает количество параллельных полос. Одновременно возрастает и число кольцевых полос у выявленных дефектов, а также появляются новые кольцевые полосы в окрестностях более слабых отслоений, не проявившихся на ранней стадии нагружения.

Ограничением числа последовательных стадий нагружения является требование отсутствия нарушения адгезионной стойкости покрытия по отношению к исходному состоянию. Максимальная нагрузка подбирается так, чтобы не возникли новые дефекты, а линейные размеры существующих не увеличивались.

Сопоставление экспериментально видимых интерференционных полос и их числа на характерных отслоениях при известной цене полосы в 0,32 микрона по перепаду высот с результатами расчета показало их удовлетворительное согласование с 20 ... 30%-ным расхождением по габаритным размерам отслоений.

Проведенное исследование показало возможность оперативного лазерно-интерферометрического контроля отслоений покрытий при использовании ясной физико-математической модели проявления этих отслоений, основанной на легко реализуемых деформациях изгиба тонких тел с покрытиями.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (N 98-01-00964) и Федеральной целевой программы "Интеграция" (A0083).

ЛИТЕРАТУРА

1. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 339 с.
2. Vest Ch.M. Holographic interferometry. N.Y. etc.: Wiley, 1979. 478 p. = Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1974. 559 с.
4. Пономарев И.И., Попов А.Л., Чернышев Г.Н. Определение остаточных закалочных напряжений в стекле методом голографической интерферометрии // Изв. РАН. МТТ. 1994. № 5. С. 169–174.
5. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука. Физматлит, 1996. 240 с.

Москва

Поступила в редакцию
22.IV.1999