

*А.В. МАРТЫНЕНКО*, НТУ “ХПИ”

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРООБЪЕМНЫХ ПЕРЕДАЧ**

У статті проведений короткий огляд експериментальних методів дослідження. На його основі вибраний адекватний вирішуваний задачі експериментальний метод голографічної інтерферометрії. Розглянені його основні принципи. Проведений експеримент. Зроблені висновки і намічені подальші напрями досліджень.

The brief review of research experimental methods is conducted in the article. The adequate experimental method of holographic interferometry is chosen on its basis. Main holographic interferometry principles are considered. Experiment is held. Conclusions are done and further directions of researches are set.

**Введение.** При проведении численных исследований каких-либо механических конструкций всегда возникает задача определения достоверности полученных результатов. Для этих целей используют экспериментальные методы исследования. На современном этапе развития науки их разработано большое количество, поэтому при проведении теоретических научно-исследовательских работ с реальными конструкциями необходимо правильно осуществить выбор соответствующего экспериментального метода для подтверждения результатов численных расчетов. Данная статья посвящена обоснованию выбора экспериментального метода для исследуемого объекта – элемента гидрообъемной передачи транспортного средства [1].

**1. Обзор экспериментальных методов исследования.** Современные исследовательские задачи в машиностроении обычно связаны с определением напряженно-деформированного состояния сложной конструкции. При этом развитие компьютерной техники и программного обеспечения инженерного направления идет очень быстрыми темпами. Существующие инженерно-исследовательские комплексы, такие как, например, ANSYS, Visual Nastran Desktop 4D, ADAMS [2,3] и другие, позволяют учитывать практически любые существующие в механике теории, рабочие нагрузки и условия эксплуатации конструкции. При этом сложность компьютерной модели конструкции и количество учитываемых физических законов и параметров при проведении исследований ограничивается в основном лишь временем, отведенным на выполнение работ, и выделенным на них бюджетом. Но, несмотря на прогресс исследовательских программ, остро стоит вопрос определения точности и достоверности полученных данных, т.к. при создании модели и последующем решении задачи всегда приходится прибегать к упрощениям модели и принимать какие-либо допущения [4]. При этом сам процесс планирования, подготовки и

проведения эксперимента, а также анализа полученных в ходе его выполнения данных довольно трудоемко [5].

Рассмотрим, какими из существующих экспериментальных методов при определении напряженно-деформированного состояния структурного элемента гидрообъемной передачи мы можем воспользоваться и выберем затем из них наиболее подходящий.

Один из самых распространенных экспериментальных методов – измерение с помощью механических и оптических тензометров. В зависимости от решаемых задач существует большое разнообразие конструктивных исполнений различных типов тензометров. В основе их работы лежит один принцип – определение изменения длины, ограниченной считывающими элементами тензометра [6].

Характерные достоинства и недостатки различных типов тензометров следующие:

- Механические, оптические, струнные, емкостные, пьезоэлектрические, индуктивные, трансформаторные магнитоупругие и механотронные датчики применяются для измерения деформаций в отдельных точках, поэтому восстановление общей картины деформации сложной конструкции представляет собой довольно трудоемкий процесс. Их применение целесообразно при необходимости измерения величины деформаций и напряжений локально в наиболее нагруженных местах конструкции или в известных заранее концентраторах напряжений.

- Электротензометры позволяют получить обобщенную картину деформированного состояния. Существуют проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы. Отличаются они некоторыми свойствами и конструктивным исполнением. К их достоинствам относятся: возможность измерения в труднодоступных местах и на большом отдалении от регистрирующей аппаратуры; возможность обработки результатов в реальном времени; возможность настройки одной и той же электрической цепи для измерения различных по величине деформаций; низкая инерционность; возможность построения сложных и больших по площади охвата конструкции схем. Недостатки – тензорезисторы являются датчиками однократного действия; перед проведением эксперимента их необходимо тарировать; измеряемая величина сильно зависит от условий окружающей среды, например, температуры; качество монтажа датчика влияет на результаты измерений [7].

Основные оптические методы измерений полей перемещений и деформаций могут быть условно разделены на оптико-механические, поляризационно-оптические, методы муаровых полос, методы делительных сеток, методы голографической интерференции, методы спекл-интерферометрии. Рассмотрим их подробнее ниже.

Метод делительных сеток является наиболее простым из оптических методов. В нем на исследуемую поверхность наносят систему точек, линий или других меток, изменение взаимного расположения и конфигурации

которых позволяет определить перемещения, деформации, скорости и другие исследуемые величины. Метод сеток дает дискретную информацию, база его задается расстоянием между соседними линиями – шагом сетки. Достоинства метода состоят в простоте используемой аппаратуры, недостатки – сравнительно невысокая точность определения величин, необходимость нанесения сеток на различные поверхности требует различных подходов и специального инструмента.

Логическим продолжением метода сеток является метод муаровых полос, который основан на явлении образования квазиинтерференционных полос при наложении друг на друга прозрачных пластинок с нанесенными на них достаточно плотными массивами линий, окружностей, точек или других фигур. На исследуемый образец наносят измерительную решетку с частотой линий около 40 линий/мм. Затем образец деформируют и с помощью специальной аппаратуры совмещают эталонную решетку с нанесенной. При этом получается фиксируемая оптически картина перемещений. Достоинства метода: сравнительная простота, возможность оценивать степень изменения формы без использования сложных физических явлений и представлять все изменения, происходящие с объектом исследования, в размерах перемещений. К недостаткам можно отнести сложность нанесения решетки на исследуемый образец в определенных случаях, необходимость использования специальной измерительной аппаратуры в зависимости от способа нанесения решетки.

В основе поляризационно-оптического метода (по-другому метод фотоупругости) лежит идея определения напряженного состояния моделей деталей и конструкций, выполненных из прозрачных оптически чувствительных материалов. Он основан на поляризации света и свойстве большинства прозрачных изотропных материалов приобретать под действием нагрузки способность двойного лучепреломления. Достоинства: наглядность получаемых картин перемещений; возможность изучения нестандартных конструкций, работающих при сложных условиях нагружения; анализ сварочных напряжений. Недостатки: необходимость выполнения точной копии модели из оптически чувствительного материала, к которому предъявляются специфические требования; необходимость проведения тарировки оптического материала; необходимость в использовании специального оборудования (полярископы, полярометры, поляризационно-проекционные установки и др.).

В методе оптически чувствительных покрытий на поверхность исследуемого объекта наносится тонкий слой оптически чувствительного материала, что позволяет применить поляризационно-оптический метод для изучения непрозрачных объектов. При этом отпадает необходимость в изготовлении модели из дорогого оптически чувствительного материала. В качестве покрытий используют полимерные материалы, которые обладают необходимыми оптико-механическими свойствами и сравнительно просты в использовании. Метод позволяет эффективно решать широкий круг задач:

исследование упруго-пластических деформаций, изучение процессов разрушения и ползучести, деформации анизотропных тел, деформации в микрообластях, оценка температурных деформаций и напряжений, изучение динамических процессов, определение остаточных напряжений и др. К его достоинствам также можно отнести сравнительную простоту используемой аппаратуры. А недостатками являются: сложность выбора толщины покрытия, т.к. от нее с одной стороны зависит точность измерения, а с другой – равномерность напряженно-деформированного состояния в покрытии; температурное влияние на пленку и необходимость тарировочных испытаний.

Голографическая интерферометрия – это способ получения и интерпретации интерференционных картин, образованных волновыми фронтами, если, по крайней мере, один из них восстановлен с помощью голограммы. Этот способ позволяет измерять оптическую разность хода интерферирующих волн, которая может быть обусловлена такими факторами, как: изменение формы и положения исследуемого объекта в пространстве, изменение оптических характеристик среды или объекта, изменение длин интерферирующих волн и др. К ее достоинствам можно отнести: возможность использования в исследованиях широкого диапазона волн (электромагнитные, рентгеновские, акустические); наличие нескольких схем записи голограмм, которые зависят от требуемых данных; широкий диапазон решаемых задач; размер голограммы в общем случае не зависит от размера исследуемой конструкции – чем она больше, тем более точные экспериментальные данные мы получим. Недостатки: громоздкость и высокая цена экспериментальных установок (необходим лазер и регистрирующие фотопластины) и относительная сложность интерпретации полученных данных [8].

Логическим продолжением голографической интерферометрии стала спекл-интерферометрия. Этот метод основан на спекл-эффекте, наблюдаемом оптическими приборами с ограниченной апертурой при отражении когерентной волны от диффузно-отражающей поверхности. При этом чувствительность интерференционных полос к величине и направлению смещения поверхности варьируется в значительно более широких пределах, нежели в методах голографической интерферометрии. Кроме того, здесь не требуется очень высокой разрешающей способности регистрирующей среды, понижены требования к механической стабильности элементов и значительно упрощена автоматизированная оценка интерферограмм [9].

Среди других методов стоит также упомянуть метод хрупких покрытий, который аналогичен методу оптически чувствительных покрытий и отличается от него типом используемых материалов и, соответственно, последующей интерпретацией экспериментальных данных. А также ультразвуковой метод определения напряжений, который требует специального оборудования.

## **2. Выбор метода экспериментальных исследований. После**

тщательного изучения всех достоинств и недостатков изложенных выше экспериментальных методов выбор пал на голографическую интерферометрию в сочетании со спекл-интерферометрией. Основные преимущества при их сочетании следующие:

- данные методы обладают высокой чувствительностью и наглядностью получаемых результатов;
- хорошая разрешающая способность голограмм позволяет записать большой объем информации на одном материальном носителе;
- данные методы ранее использовались в совместных исследованиях ученых НТУ «ХПИ» и НАУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» при создании программно-аппаратного комплекса по исследованию сложных механических конструкций. Это позволяет перенять практический опыт и получить доступ к обширной информационной базе [10-12];
- в сочетании с современной компьютерной техникой эти методы позволяют облегчить количественное нахождение полей перемещений, деформаций и напряжений в сложных конструкциях и определенным образом избежать неоднозначности интерпретации интерференционных картин, получаемых при измерениях.

### **3. Голографический метод экспериментальных исследований.**

Голография основана на принципах волновой оптики – законах интерференции и дифракции световых волн, испускаемых источниками света, и представляет собой запись на специальном носителе интерференционной картины распределения амплитуд волн от разных источников с последующим ее воспроизведением. Для получения хорошо различаемой интерференционной картины источники должны обладать определенным свойством – когерентностью, т.е. одинаковой частотой и постоянной в течении промежутка времени получения голограммы разностью фаз. Различают два типа когерентности — пространственную и временную. Чтобы свет обладал временной когерентностью, он должен состоять из волн одной строго определенной длины, т.е. быть строго монохроматическим. Пространственная когерентность характеризует регулярность фазы световой волны по ее фронту. Чем больше длина когерентности, тем монохроматичнее источник света и тем легче получить интерференционную картину с помощью излучаемых им волн. Именно поэтому в голографии используют лазерные источники световых волн, для которых длина пространственной когерентности может достигать 1 км [13].

В общем случае электромагнитная волна, частным случаем которой является световая, описывается временной и пространственной зависимостью вектора напряженности электрического поля  $E$  :

$$E = A \cos(\omega t - \alpha). \quad (1)$$

Более полное описание, включающее вектор напряженности магнитного поля  $H$  , вектор электрического смещения  $D$  и вектор магнитной индукции

$B$ , не требуется, т.к. в методе голографии исследователя интересует форма волны, а не ее физическая природа. К тому же регистрирующие фотографические материалы, используемые в голографической интерферометрии, реагируют главным образом на электрическое поле  $E$ , точнее, на освещенность  $I$ , которая представляет собой усредненный во времени световой поток и определяется по формуле:

$$I = \varepsilon v (E^2), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, в которой он распространяется.

В методе голографии используются две световые волны  $E_1$  и  $E_2$  одинаковой частоты, которые налагаются друг на друга. Их освещенность определяется выражением:

$$I = \overline{E_1^2} + \overline{E_2^2} + 2\overline{E_1 \cdot E_2}. \quad (3)$$

Учитывая волновую природу напряженности волн (1):

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t - \alpha_1); \quad E_2 = A_2 \cos(\omega t - \alpha_2), \quad (4)$$

получим общую интерференционную картину потока освещенности регистрирующей пластины:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2), \quad (5)$$

где  $(\alpha_1 - \alpha_2)$  – разность фаз двух интерферирующих волн в произвольной точке, которая будет определять максимум или минимум освещенности в данной точке.

В интерференционной картине записана вся возможная информация об излучении источников. Используя голограмму, можно найти: длину волны светового излучения источников, их расположение, соотношение фаз колебаний, оценить интенсивность излучения и его когерентность. Исследования полученных голограмм путем восстановления основаны на оптическом законе дифракции.

Принципиальная схема получения голограммы объекта и восстановления записанного на ней изображения приведена на рис. 1. Системы линз 3 и 6 необходимы для получения из узкого пучка световых волн, испускаемых лазером широкой плоской волны.

Приведенная схема получения голограммы является частным случаем, в общем же схема получения голограммы зависит от метода ее регистрации и определяется положением фотографической пластинки относительно источника светового излучения и исследуемого объекта.

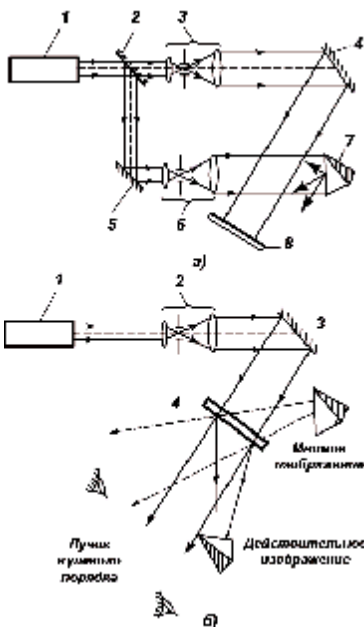


Рис. 1. Голографические схемы:

а – схема получения:

- 1 – лазер;
- 2 – расщепитель пучка;
- 3 и 6 – линзовые системы;
- 4 и 5 – зеркала;
- 7 – объект;
- 8 – фотопластинка

б – схема восстановления:

- 1 – лазер;
- 2 – линзовая система;
- 3 – зеркало;
- 4 – голограмма

Принято различать амплитудные и фазовые голограммы в зависимости от того, каким способом зарегистрирована интерференционная структура на светочувствительном материале: в виде вариации коэффициента пропускания (отражения) света или в виде вариации коэффициента преломления (толщины рельефа) светочувствительного материала. Первые при восстановлении волнового фронта модулируют амплитуду освещающей волны, а вторые модулируют фазу освещающей волны. Часто одновременно осуществляются фазовая и амплитудная модуляции.

Голографическое изображение характеризуется рядом особенностей, связанных с тем, что для его получения используется высококогерентное излучение лазера:

- голограмма не имеет точечного соответствия, которое характерно для фотографического изображения, и одной точке объекта соответствует вся поверхность голограммы;
- голограмма обладает более высокой надежностью хранения информации об объекте, т.к. любой (даже небольшой) участок голограммы способен восстановить изображение всего объекта, благодаря чему голограмма имеет высокую помехозащищенность и помехоустойчивость;
- размеры голограммы определяются требованиями к степени различимости (разрешению) деталей объекта;
- форма, размеры и положение в пространстве восстановленного изображения находятся в прямой зависимости от положения в пространстве

восстанавливающего источника и характеристик восстанавливающей волны: формы фронта, длины волны и ее поляризации, поэтому дополнительное увеличение можно получить, если увеличить длину волны света восстанавливающего пучка;

- полезным свойством голограмм является их способность компенсировать искажения, которые могут возникать при записи волновых фронтов объектов, например, голограмма не чувствительна к изменению плотности атмосферы, если объектный и опорный пучки проходят через одну и ту же неоднородность;

- способность голограммы выделять образ, записанный на ней, является самым ценным свойством голографии;

- особые свойства имеют трехмерные голограммы, впервые полученные Ю.Н. Денисюком в толстослойных фотоэмульсиях, толщина которых существенно превышает расстояние между соседними интерференционными поверхностями [14]. В этом случае интерференционная структура будет зафиксирована в фотоэмульсии в виде полупрозрачных отражающих слоев серебра, образующих трехмерную дифракционную решетку. Если такую голограмму осветить белым светом, то из его широкого спектра голограмма сама выделит свет только одной длины волны и определенного направления, поэтому при восстановлении трехмерную голограмму не обязательно освещать лазером, а можно пользоваться обычным источником света.

Кроме метода Денисюка существует еще несколько методов записи трехмерных голограмм. Это метод Габора, которого считают отцом голографии, и совместный метод известных в области голографии ученых Лейта и Упатниекса. На рис. 2 показан принцип получения и восстановления этих голограмм.

На рис. 2, *а* условно изображен световой поток от источника света  $S$ , который проходит через объект  $O$  и образует световые поля (изображенные линиями со стрелками), в которых происходит интерференция волн. В этих полях установлены три фотопластинки, на которых получают голограммы:  $\Gamma_1$  – голограмма Габора,  $\Gamma_2$  – голограмма Лейта и Упатниекса,  $\Gamma_3$  – голограмма Денисюка.

Ниже показаны схемы восстановления изображения. По схеме Денисюка (рис.2, *б*) видно, что единственное изображение расположено за голограммой и имеет совершенно натуральный вид. При восстановлении по Габору (рис. 2, *в*) на одной оси расположены и действительное, и мнимое изображения. При рассматривании они накладываются одно на другое, что значительно снижает эффект их распознавания. В установке Лейта и Упатниекса (рис. 2, *з*) наблюдатель в нижней правой части рисунка видит только одно изображение объекта. Для различения второго нужно изменить точку наблюдения. Восстановленные объекты разнесены, что устраняет искажения при наблюдении.



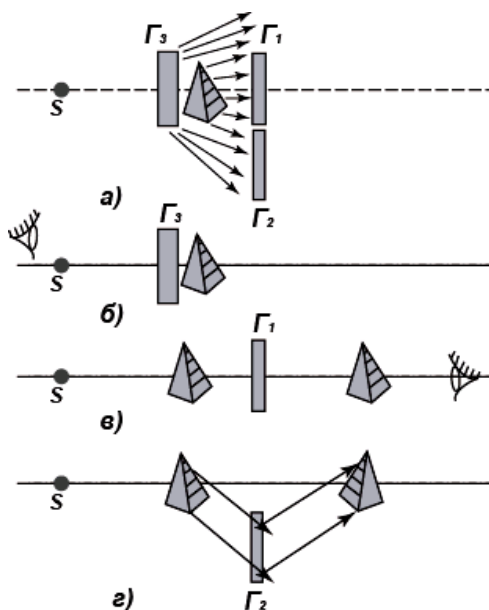


Рис. 2. Схемы записи голограмм (а) и схемы восстановления Денисюка (б), Габора (в), Лейта и Упатниекса (г)

Голографическая интерферометрия — один из наиболее важных и развитых разделов голографии. В основе ее разнообразных методов лежит принцип сравнения двух волновых фронтов, причем один из них или оба записывают и восстанавливают голографическим методом. Имеется несколько вариантов метода голографической интерферометрии: метод двух экспозиций, метод реального времени, метод усреднения во времени и стробоголографический метод [15].

В методе двух экспозиций сначала получают голограмму исследуемого предмета в первоначальном состоянии, т. е. не нагруженного, не нагретого и не деформированного и т.д. Затем предмет подвергают внешним воздействиям и на ту же фотопластинку записывают голограмму его измененного состояния. При восстановлении изображения с двукратно экспонированной голограммы наблюдается результат интерференции полей, существующих в разные моменты времени — во-первых, волнового поля, несущего информацию о первоначальном состоянии объекта, и, во-вторых, волнового поля, несущего информацию о его измененном состоянии. В результате на изображение объекта накладывается сеть интерференционных полос, по которым определяют изменения, происшедшие с объектом.

Разница между методом двух экспозиций и методом реального времени

заключается лишь в том, что при использовании последнего вместо второй экспозиции голографическое изображение непосредственно «интерферирует» с предметом, с которого получена голограмма. При восстановлении опорный и объектный пучки освещают голограмму и объект, с которого она получена, и отраженные волны интерферируют между собой. Это позволяет сравнить реальный объект с «идеальным», т. е. эталонным объектом. Он может быть представлен, например, голограммой, синтезированной на ЭВМ.

Метод усреднения во времени позволяет изучать формы колебаний объектов при воздействии на них периодической нагрузки. Голограмма в этом случае экспонируется в течение промежутка времени, значительно превышающего период колебаний исследуемого объекта, и в результате ее восстановления будет получено контурное изображение стоячих волн, установившихся на колеблющейся поверхности объекта. Несмещающиеся точки объекта называются узловыми и на интерферограмме имеют вид ярких пятен. Основным преимуществом измерения вибрации таким способом является бесконтактность.

Стробоголографический метод применяется совместно с методом реального времени. Вначале получают голограмму неподвижной поверхности объекта и после проявления возвращают фотопластинку в исходное положение. Затем возбуждают вибрацию поверхности и освещают ее во время каждого периода колебаний коротким световым импульсом. Если импульс достаточно короткий, то этот метод эквивалентен методу голографической интерферометрии реального времени для неподвижных объектов. Но так как световой импульс может освещать вибрирующую поверхность в различных фазах колебания, этот метод дает возможность сравнивать положение поверхности в любой фазе колебаний с положением неподвижного объекта.

Перечисленные методы дают возможность эффективно контролировать и измерять деформации деталей и отдельных частей, определять распределение напряжений по объекту и наличие в них дефектов. Поэтому они активно применяются для проведения экспериментальных исследований механических конструкций.

Наиболее существенные свойства голографической интерферометрии, которые определяют его повсеместное использование, следующие:

- высокая информативность голограммы обеспечивает анализ тонкой структуры световой волны (например, ее поляризацию) и дает возможность исследовать объекты произвольной формы, в то время как в классической интерферометрии возможно изучение объектов только простой формы и с высоким качеством поверхности;
- низкие требования к качеству оптики, поскольку объектная и опорная волны в одинаковой мере искажаются несовершенствами оптических деталей, проходя по одному и тому же пути в пространстве, поэтому одинаковое изменение оптической разности хода лучей не скажется

на конечной интерференционной картине, что позволяет значительно уменьшить стоимость голографических интерферометров;

- голографические интерферограммы можно получать почти мгновенно при помощи импульсного лазера, а затем изучать их, используя источник света непрерывного действия при восстановлении, что очень важно при изучении быстропротекающих событий;

- используя временную фильтрацию, можно формировать интерферограммы, выявляющие изменение во времени какой-либо одной частотной компоненты волны, например, метод усреднения во времени, используемый для изучения механических колебаний.

Основным недостатком методов голографической интерферометрии является качественный характер информации, получаемой от объекта исследования. Получение количественной информации требует громоздких математических вычислений и сложного аппаратного решения измерительного устройства, что приводит в известной мере к увеличению погрешности и трудности получения измерительной информации в реальном времени [16]. Однако развитие современной компьютерной техники и методов цифровой регистрации изображения позволяют в определенной степени устранить эти недостатки.

Логическим продолжением и дальнейшим развитием методов голографической интерферометрии является спекл-интерферометрия. В ее основе лежит спекл-эффект, который приводит к формированию случайной интерференционной картины, наблюдаемой при рассеянии когерентного света на оптически грубой поверхности. В спекл-интерферометрии можно выделить два основных метода: корреляционную спекл-интерферометрию и спекл-фотографию. В каждом из этих методов оптически шероховатая поверхность регистрируется в начальном положении и смещенном относительно него, затем анализируется картина интерференционных полос. Отличия метода спекл-фотографии от корреляционной спекл-интерферометрии заключаются в возможности изменения чувствительности к значению смещения и в отсутствии опорного пучка при фотозаписи. Корреляционная спекл-интерферометрия представляет собой измерительный метод, в котором происходит когерентное сложение (интерференция) поля, имеющего спекл-структуру, с плоской опорной волной или с другим полем, имеющим спекл-структуру. В методе спекл-фотографии предмет освещается единственным световым пучком. Часть пучка, рассеянного поверхностью предмета, собирается с помощью линзы на фотопластинку. Фотозапись на эту пластинку осуществляется дважды: до смещения предмета и после смещения.

Главное преимущество метода состоит в простоте оптической схемы и относительной легкости представления и интерпретации результатов. Требования к механической стабильности значительно менее жесткие, чем при голографической интерферометрии. Чувствительность метода можно варьировать в процессе считывания информации, и она в большинстве

случаев меньше, чем для голографической интерферометрии.

Максимальная чувствительность и минимизированная погрешность измерений смещений деформируемых твердых тел может быть достигнута схемным синтезированием основных параметров голографических и спекл-интерферометров, а именно, использованием в качестве базисных методов, совмещающих голографическую и спекл-интерферометрию. В данном случае спекл-структура в голографическом изображении рассматривается как полезный эффект, обладающий информативностью и позволяющий одновременно, на одной регистрирующей среде, фиксировать как голографические, так и спекл-интерферограммы, а также получать спекл-фотографии с восстановленных действительных и мнимых голографических изображений объекта.

Одним из наиболее перспективных путей развития голографической спекл-интерферометрии является комбинация измерительных устройств с ЭВМ. В таких случаях, используя цифровую камеру или другое фиксирующее устройство, получают цифровое представление интерферограмм, которое передается непосредственно на ЭВМ, где и происходит хранение и дальнейшая обработка.

**4. Результаты экспериментальных исследований.** Основными характеристиками исследуемого объекта, которые необходимо принимать во внимание при выборе той или иной голографической установки, являются степень прозрачности, отражательная способность и микрорельеф поверхности, габариты, форма и его стабильность во времени. Для голографических интерферометров наиболее существенным является деление объектов на прозрачные и непрозрачные, т.к. в первом случае интерференционная картина соответствует показателю преломления, а во втором характеризует изменение формы отражающей поверхности.

Экспериментальные исследования производились на голографической установке СИН, укомплектованной гелий-неоновым (He-Ne) лазером ЛГН-215. Общая схема установки приведена на рис. 3.

Подставка 6 имеет четыре опоры, на которые опирается плита в нерабочем состоянии, и крышку для размещения воздушных подушек системы виброизоляции 4. В рабочем положении подушки наполняются воздухом с избыточным давлением 0,01—0,02 МПа. В результате обеспечивается хорошая виброизоляция плиты, что позволяет получать в опытных лабораторных условиях высококачественные голограммы с экспозициями до 1 ч. Для крепления рейтеров с оптическими элементами 1 на рабочей поверхности плиты 2 имеются продольные Т-образные пазы. Данная установка предназначена для получения и исследования голограмм стационарных или медленно изменяющихся объектов и позволяет осуществлять разнообразные голографические схемы и схемы восстановления изображений объекта как в проходящем, так и в отраженном свете. Реальный общий вид установки показан на рисунке 4.

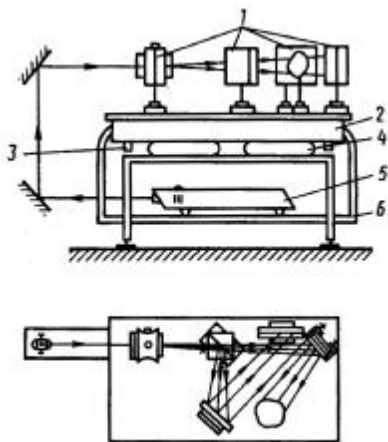


Рис. 3. Схема  
интерференционной  
голографической установки  
СИН-1:

- 1 – рейтеры с оптическими  
элементами  
голографической схемы;
- 2 – рабочая плита;
- 3 – опоры;
- 4 – система виброизоляции;
- 5 – лазер;
- 6 – подставка



Рис.4. Общий вид установки СИН-1



Рис.5. Получение экспериментальных  
данных

Процесс получения экспериментальных данных проиллюстрирован на рис. 5. Исследовалась масштабная модель части блока цилиндров, выполненная из низко модульного материала (для обеспечения большей наглядности интерференционных картин). Соответственно моделировалась и нагрузка в виде внутреннего давления рабочей жидкости.

На рис. 6 приведены некоторые из полученных спекл-интерферограмм. Дополнительную информацию по этому вопросу можно найти в работе [17].

Какими бы ни были получаемые в голографической интерферометрии данные, всегда возникает необходимость их расшифровки и представления в удобном для дальнейшей работы виде, поэтому разработка методик распознавания голограмм является очень важным этапом. Голографическая интерферограмма диффузно отражающего предмета несет информацию о перемещениях точек его поверхности по всем трем координатам, поэтому процесс их расшифровки сводится к получению по интерференционной

картине компонент векторов перемещений точек исследуемой поверхности.

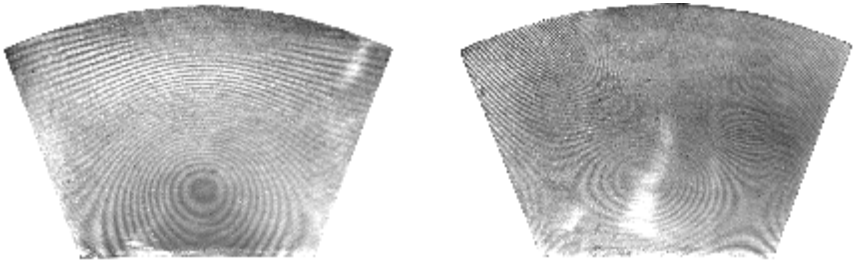


Рис. 6. Интерферограммы боковой поверхности модели, полученные в ходе выполнения эксперимента

Самый распространенный метод распознавания голограмм строится на использовании соотношения, связывающего суммарный фазовый сдвиг волн, рассеянных точками поверхности объекта в исходном и смещенном положениях, с векторами перемещений:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r (\rho_0 + \rho) = \delta, \quad (6)$$

где  $\Delta r$  – вектор перемещения точки объекта между экспозициями,  $\rho_0$  – орт нормали к фронту освещающей волны в точке,  $\rho$  – орт направления наблюдения точки,  $\lambda$  – длина волны используемого когерентного излучения.

Следующий способ, который обычно называют одноголограммным, основывается на определении количества полос, проходящих над исследуемой точкой мнимого изображения, восстановленного с голограммы, при изменении направления его наблюдения. Для определения вектора перемещения точки объекта  $\Delta r$  необходимо для исследуемой точки решить систему уравнений

$$\Delta r (\rho - \rho_n) = \lambda k_n \quad (n = 1, 2, 3), \quad (7)$$

где  $(\rho - \rho_n)$  – разность между одним общим ортом направления наблюдения точки, проходящим обычно через центр голограммы, и одним из трех разнесенных в пределах голограммы ортов направления наблюдения той же точки;  $k_n$  – число полос интерференции, которые прошли через исследуемую точку при соответствующем изменении направления ее наблюдения.

Развитием этого способа является метод трех голограмм, предполагающий запись изображения на расположенные определенным образом три голограммы. При восстановлении изображения каждая из голограмм дает свою картину интерференции. Определив порядок полосы интерференции на каждой из голограмм для исследуемой точки поверхности,

можно вычислить значение и направление перемещения этой точки между экспозициями. При наличии трех интерферограмм для определения вектора перемещения исследуемой точки решается система уравнений

$$\Delta r(\rho_0 + \rho_i) = \lambda k_i \quad (i = 1, 2, 3), \quad (8)$$

где  $\rho_i$  — орт наблюдения точки с  $i$ -й голограммы;  $k_i$  — порядок полосы в точке с  $i$ -й голограммы.

После постановки данных в систему получается матричное уравнение

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} A = \lambda \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

с его помощью компоненты вектора перемещения в исследуемых точках выражаются через элементы матрицы  $A$ . Этот процесс легко поддается автоматизации с использованием ЭВМ, именно поэтому он наиболее перспективен.

Преимущество метода трех голограмм состоит в том, что выбор направления наблюдения не ограничен размерами голограммы. Каждую из трех голограмм можно располагать произвольным образом и на значительном расстоянии друг от друга, т. е. направления наблюдения могут существенно отличаться. А это означает, что точность измерения перемещений будет значительно выше, чем при измерениях с использованием одной голограммы.

Определение компонент перемещений по фазовому методу и последующее их сравнение с результатами численных исследований подтвердило адекватность выбора в качестве метода исследований метода голографической интерферометрии в сочетании со спекл-интерферометрией.

**5. Заключение.** В статье представлен краткий обзор методов экспериментальных исследований и выбран метод, наиболее соответствующий решаемой задаче. Сравнение экспериментальных данных с результатами численных исследований подтвердили правильность выбора метода. Сочетание данного экспериментального метода с параметрическим подходом позволяет производить исследования практически любых элементов механических систем [18].

В дальнейшем планируется автоматизация расшифровки получаемых голограмм с помощью вычислительной техники. Полученные с цифрового фотоаппарата спекл-интерферограммы будут обрабатываться специальным программным обеспечением. Это позволит перейти от графического образа (картины интерференционных полос), т.е. практически непрерывного распределения исследуемых функций, к дискретной системе значений на наперед заданной сетке узлов, а в завершении – к непрерывному заданию

данных функций через интерполяционные функции. Таким образом, ускоряется обработка экспериментальных данных и производится точная их интерпретация, и с заданной точностью можно определить значение искомой функции в заданной точке конструкции.

Данный экспериментальный метод легко поддается интеграции в расчетно-экспериментальную систему, основанную на обобщенном параметрическом подходе, который позволяет производить исследования сложных и сверхсложных систем. Причем не только механических, но и практически любого происхождения [19].

**Список литературы:** 1. *Аврунин Г.А., Кабаненко И.В., Хавиль В.В.* Объемная гидропередача с шариковыми поршнями ГОП-900: характеристики и технический уровень // *Механика та машинобудування*, 2004, №1, С.14-22. 2. *Сабонадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л.* Метод конечных элементов и САПР – М.: Мир, 1989. 3. *Чемоданова Т.В.* Pro/ENGINEER: Деталь, Сборка, Чертеж. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 560 с. 4. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справочное пособие. / под ред. Касаткина Б.С. – К: “Наукова думка”, 1981 – 584 с. 5. *Монтгомери Д. К.* Планирование эксперимента и анализ данных: Пер. с англ. – Л.: “Судостроение”, 1980. – 384 с. 6. Тензометрия в машиностроении. / под ред. Макарова Д.А. – М: “Машиностроение”, 1975. 7. *Дайчин* Методы и средства натурной тензометрии – М: “Машиностроение”, 1990. 8. Оптическая голография / под ред. Колфилда Г., в 2-х томах – М: “Мир”, 1982 – 736 с. 9. *Клименко И.С.* Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия – М: «Наука», 1985 – 224 с. 10. *Капустин А.А.* Методы, использующие голографическую интерферометрию для спекл-интерферометрических измерений / В кн.: Методические указания. Применение спекл-интерферометрии для контроля качества промышленных изделий. – Горький: ГФ. ВНИИМАШ, 1980.– С.45–53. 11. *Капустин А.А.* Исследование и применение методов спекл-интерферометрии, использующих голографические изображения. – Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МФТИ, 1981. – 24 с. 12. *Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем // *Динамика и прочность машин.* – 2002. – №10. – С.126-132. 13. *Морозов А.М., Кононов И.В.* Оптические голографические приборы – М: “Машиностроение”, 1988 – 128 с. 14. Денисюк Ю.Н. Принципы голографии. Лекции. – Л: Государственный оптический институт им. С.П. Вавилова, 1979 – 125 с. 15. *Франсон М.* Голография – М: “Мир”, 1972 – 247 с. 16. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Липовецкий Л.С., Глуценко Э.В., Гоголь Н.А.* Методика экспериментального исследования элементов механических систем методом голографической интерферометрии // *Механика та машинобудування* . – 2005 – №1 . – С.88-99. 17. *Мартыненко А.В., Ткачук А.В., Зарубина А.А., Васильев А.Ю.* Расчетно-экспериментальное исследование элементов гидрообъемных передач // *Вестник НТУ “ХПИ”*. Тематический выпуск “Динамика и прочность машин”. – 2005. – Вып. 47. – С – Харків: НТУ “ХПИ”, 2005.– № 47. – с.99-107. 18. *Гриценко Г.Д., Малакей А.Н., Миргородский Ю.Я., Ткачук А.В., Ткачук Н.А.* Интегрированные методы исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик элементов сложных механических систем // *Механика та машинобудування.* – 2002.– №1. – С.6-13. 19. *Веретельник Ю.В.* Расчетно-экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния титановых эндопротезов. // *Вестник НТУ “ХПИ”* Тематический выпуск “Машиноведение и САПР” – Харків: НТУ “ХПИ”, 2005.– № 53. – с.40-54.

*Поступила в редколлегию 10.01.2006*