

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ НАГРУЖЕНИИ  
ТРЕХМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ  
ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

**Методические указания  
по выполнению лабораторных работ**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Физико-технический факультет

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ НАГРУЖЕНИИ  
ТРЕХМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ  
ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ  
по курсу «Экспериментальная механика»  
для студентов физико-технического факультета  
направления подготовки 15.03.03 – Прикладная механика

Томск  
2017

РАССМОТРЕНЫ И УТВЕРЖДЕНЫ методической комиссией физико-технического факультета

Протокол № 10 от «30» июня 2017 г.

Председатель МК ФТФ В.А. Скрипняк

Методические указания составлены в соответствии с тематикой лабораторных занятий и программой курса «Экспериментальная механика» студентов физико-технического факультета направления подготовки 15.03.03 – Прикладная механика. В методических указаниях рассмотрены теоретические основы и порядок экспериментального исследования распределения малых деформаций в конструкциях методами голографической интерферометрии.

Для преподавателей и студентов вузов.

**СОСТАВИТЕЛИ: В.А. Скрипняк, В.В. Каракулов**

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ТРЕХМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать распределение напряжений при деформации объекта.

## 2. ЗАДАНИЕ

2.1. Ознакомиться с принципами голографической интерферометрии, спекл-интерферометрии, их практическими применениями.

2.2. Собрать оптическую схему записи двухэкспозиционной голограммы объекта.

2.3. Записать двухэкспозиционную голограмму, провести фотообработку.

2.4. Восстановить с полученной голограммы интерференционную картину, зарисовать и качественно проинтерпретировать ее относительно распределения напряжений в деформированном теле.

## 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

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 измерить 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. В голографической интерферометрии имеется три основных метода: интерферометрия в реальном времени, метод двух экспозиций, метод усреднения во времени.

### 3.1. Интерферометрия в реальном времени.

Интерферометрия в реальном времени - это метод наблюдения картины интерференции двух волн, одна из которых соответствует начальному состоянию объекта и восстановлена голограммой, другая - рассеивается объектом в процессе исследования. Суть метода заключается в том, что

на голограмму записывается начальное состояние объекта, затем она подвергается фотографической обработке и устанавливается в то же положение, которое она занимала во время записи. При освещении голограмм опорным пучком за ней будет восстановлено мнимое изображение объекта, которое будет являться копией объекта и совпадать с ним в пространстве. Если осветить одновременно объект и голограмму, то за голограммой будет распространяться две предметных волны, которые когерентны и могут интерферировать между собой. Одна из них, рассеянная непосредственно объектом, будет иметь комплексную амплитуду  $A_{n1} = a_{n1} \exp(i\varphi_{n1})$ , где  $a_{n1}$  - ее амплитуда, ослабленная голограммой,  $\varphi_{n1}$  - фаза этой волны; другая - предметная волна, восстановленная голограммой:  $A_{n2} = a_{n2} \exp(i\varphi_{n2})$ . Здесь  $a_{n2}$  и  $\varphi_{n2}$  - амплитуда и фаза волны, величины которых зависят от условий регистрации и восстановления, а также характеристик светочувствительного материала и режима его обработки. В результате получим

$$A = A_{n1} + A_{n2} = a_{n1} \exp(i\varphi_{n1}) + a_{n2} \exp(i\varphi_{n2}). \quad (1)$$

Отсюда видно, что суммарная комплексная амплитуда зависит от отношения амплитуд и фаз обеих предметных волн. Если  $a_{n1} = a_{n2}$  и  $\varphi_{n1} = \varphi_{n2}$ , то волны будут максимально усиливать друг друга. Это соответствует случаю позитивной записи голограммы. Если  $\varphi_{n1}$  и  $\varphi_{n2}$  различаются на величину  $\pi$  (негативное изображение), то произойдет полное гашение интерферирующих волн и изображения объекта не будет видно. При  $a_{n1} \neq a_{n2}$  амплитуда принимает промежуточное значение, при этом, в зависимости от соотношения фаз, интерферирующие волны будут усиливать или ослаблять друг друга. Такое изменение интенсивности наблюдается, если за время регистрации и во время наблюдения не будет происходить никаких фазовых, структурных и других изменений объекта.

Допустим, что во время наблюдения с объектом будут происходить какие-либо изменения. Это приведет к появлению разности хода интерферирующих волн  $A_{n1}$  и  $A_{n2}$ . Тогда, глядя сквозь голограмму, наблюдатель будет видеть объект, покрытый интерференционными полосами, которые характеризуют изменения, происходящие с объектом.

Основным достоинством этого метода голографической интерферометрии является то, что с помощью одной голограммы можно исследовать динамику процесса. При записи голограммы на фотоэмульсии реализация метода реального времени сталкивается с определенными трудностями, связанными с точной установкой голограммы после ее обработки в исходное положение, усадкой эмульсии при ее сушке и т.д. Проконтролировать точность установки голограммы можно по картине интерференционных полос. Если голограмма сместилась в направлении наблюдения, то интерференционные полосы будут иметь вид концентрических окружностей. При повороте голограммы в своей плоскости наблюдаются прямые полосы, ориентация которых зависит от направления наблюдения. Если голограмма повернута вокруг оси, расположенной в ее плоскости, то образуются прямые интерференционные полосы, параллельные оси вращения. Наконец, при параллельном смещении голограммы в своей плоскости возникают прямые полосы, перпендикулярные направлению смещения.

Видность интерференционной картины в данном методе зависит от соотношения интенсивностей интерферирующих волн в процессе наблюдения. Лучшие результаты получают при одинаковой их интенсивности, что может быть достигнуто либо путем соответствующего подбора условий регистрации и обработки голограммы, либо путем введения ослабляющих светофильтров в опорный или предметный пучки на стадии восстановления.

### 3.2. Метод двух экспозиций.

Метод двух экспозиций заключается в том, что на один и тот же светочувствительный материал записывают две голограммы, соответствующие исходному и конечному состоянию объекта. Так как при записи обеих голограмм используется одна и та же опорная волна, то на этапе восстановления одновременно восстанавливаются две волны, которые могут интерферировать. Если в промежутке между двумя экспозициями с объектом произошли какие-либо изменения, то при восстановлении будет наблюдаться изображение объекта, покрытое интерференционными полосами. В отличие от реального времени в данном случае не требуется точно устанавливать голограмму в исходное положение, и поэтому процесс восстановления можно осуществить даже на другой установке. Так как обычно условия записи обеих голограмм идентичны, то амплитуды

обеих предметных волн будут равны, и видность интерференционных полос будет максимальной (около единицы).

### 3.3. Метод усреднения во времени.

Этот метод, разработанный Пауэллом и Стетсоном, применяют для исследования вибрирующих поверхностей. Пауэлл и Стетсон показали, что если при получении голограммы поверхность объекта вибрирует, то восстановленное такой голограммой изображение поверхности оказывается промодулированным системой интерференционных полос. Наиболее яркая полоса совпадает с узловой областью, т.е. с тем участком поверхности, который оставался неподвижным во время вибрации. Кроме того, на голографическом изображении наблюдается еще несколько полос, каждая из которых соответствует геометрическому месту точек, вибрирующих с постоянной амплитудой.

Когда объект испытывает синусоидальные колебания, он проводит большую часть времени вблизи двух положений максимального смещения, в которых его скорость равна нулю. Поэтому усредненная во времени голографическая интерферограмма такого объекта качественно похожа на двухэкспозиционную голографическую интерферограмму, соответствующую двум положениям объекта. Количественная интерферография требует более строгого анализа.

### 3.4 Метод стробоскопической голографической интерферометрии.

Суть метода состоит в том, что для записи голограммы используется последовательность коротких лазерных импульсов, синхронизированных с вибрирующим объектом. В большинстве случаев голограмма образуется при освещении фотопластинки короткими световыми импульсами в моменты, когда объект находится в состояниях, соответствующих его максимальному положительному и отрицательному смещению. Так, если движение описывается функцией  $A \sin(\omega t)$ , то световые импульсы соответствуют моментам, для которых  $\omega t = \pi/2$  и  $\omega t = 3\pi/2$ . Последовательность таких импульсов повторяется до тех пор, пока полная экспозиция пластинки не достигает желаемого уровня. Стробоскопическая интерферограмма также качественно напоминает двухэкспозиционную.



В стробоскопической схеме на этапе записи голограммы иногда осуществляют сканирование опорного пучка по фотоматериалу одновременно с движением исследуемого объекта. Предварительно пластинка экспонируется при некотором начальном состоянии объекта. Благодаря сканированию опорного пучка каждый участок голограммы содержит информацию о деформации объекта в разные моменты времени. Перемещая свой глаз относительно голограммы, наблюдатель может проследить за изменением деформации во времени.

Этот метод можно применять и для наблюдения в реальном времени. Для этого в методе реального времени после установки голограммы объекта в исходном положении на то же место, которое она занимала при голографической регистрации, вибрирующий объект затем освещают стробированными световыми импульсами, а голограмму восстанавливают непрерывной опорной волной. Этот метод обладает преимуществами наблюдения в реальном времени, имея полезное свойство стробоскопической интерферометрии - высокую видность интерференционной картины.

Голографическая интерферометрия имеет много общего с классической (оптической) интерферометрией, но в то же время имеет ряд принципиальных отличий. Голографическая интерферометрия позволяет проводить сравнение более сложных волновых фронтов. При этом интерферограммы характеризуют не только изменения, происходящие с объектом, но и светорассеивающие свойства его поверхности. Поэтому голографическая интерферометрия дает возможность изучать объекты, имеющие сложную форму и произвольную микроструктуру, а не только объекты с оптически совершенной поверхностью и простой формой, как в оптической интерферометрии. Кроме того, голографическая интерферометрия обладает следующими преимуществами: менее жесткие требования, предъявляемые к оптическим элементам схемы; возможность сравнения световых волн, рассеянных объектом в различные моменты времени; возможность анализировать изменения интерференционной картины при ее наблюдении через голограмму под разными углами; возможность записи на одну и ту же фотопленку нескольких интерферограмм. Вместе с тем голографическая интерферометрия имеет ряд недостатков: высокие требования, предъявляемые к пространственной и временной когерентности источников света; высокая разрешающая способность регистрирующих сред; необходимость виброзащиты элементов голографической схемы.

Применительно к анализу деформаций металлов голографическую интерферометрию в настоящее время используют в двух основных направлениях. Во-первых, в научно-исследовательской работе для количественного анализа деформированного состояния, изучения развития трещин, исследования процесса ползучести, температурных задач и т.п. (табл. 1). Во-вторых, в промышленных и лабораторных условиях для выявления внутренних и наружных дефектов материалов и изделий, оценки качества поверхности, отклонений формы и других задач неразрушающего контроля. Для этих целей наиболее широкое применение нашли следующие специально разработанные методы голографической интерферометрии: усреднения во времени, стробоскопический, иммерсионный, двух источников, двух длин волн и некоторые другие. Отметим, что для более эффективного выявления дефектов необходимо использовать определенное сочетание характера и вида нагрузки (табл. 2).

Таблица 1

Методы голографической интерферометрии, используемые для анализа физико-механических характеристик прочности и разрушения

Метод	Деформированное состояние			Разрушение		
	статическое	ударное	колебательное	излом	прочность	поврежденность
Двух экспозиций	+	+	+	-	+	+
Реального времени	+	+	+	-	+	+
Усреднения по времени	-	-	+	-	+	+
Стробоскопический	-	-	+	-	+	+
Двух длин волн	+	-	-	+	-	-
Двух источников	+	-	-	+	-	-
Иммерсионный	+	-	-	+	-	-

Таблица 2

Вид и характер нагружения, используемые при неразрушающем контроле

Вид нагружения	Характер нагружения		
	статический	периодический	ударный
Механический	+	+	+
Акустический	-	+	+
Термический	+	-	-

### 3.5. Спекл-интерферометрия.

Если осветить диффузно-отражающий объект когерентным пучком света, то на поверхности объекта образуется зернистая структура, кото-

рая отражает микрорельеф этой поверхности. Размеры отдельных зерен неразличимы невооруженным глазом и могут быть определены по формуле:  $D \approx 1,2\lambda F$ , где  $F$  - величина апертуры линзы, дающей изображение;  $\lambda$  - длина волны света. Так для аргонового лазера с длиной волны 0,5145 мкм и апертуры, равной 4, получим зерно размером 2,5 мкм.

Для получения спекл-интерферограммы на одну и ту же пластинку камеры 4 регистрируют два изображения объекта исследования, характеризующих исходное и деформированное состояние. После фотохимической обработки на такой фотопластинке будет зарегистрировано негативное изображение объекта со сложной интерференционной микроструктурой, что придает ей свойства голограммы. Распределение интенсивности света в такой микроструктуре связано с изменением взаимного положения отдельных зерен между двумя экспозициями. Поскольку размеры зерен очень малы и расположены они хаотически, то они образуют нерегулярную дифракционную решетку. В механике сплошных сред перемещения считают гладкими непрерывными функциями, и поэтому при рассмотрении достаточно малой области поверхности шаг дифракционной решетки можно принять постоянным и равным смещению зерен.

Если осветить полученное изображение нерасширенным лазерным лучом, то на экране будем наблюдать систему параллельных интерференционных полос (рис. 1), шаг которых определяют по формуле:

$$P = \frac{\lambda L}{M|\vec{S}|}, \quad (2)$$

где  $L$  – расстояние от голограммы до экрана;  $M$  масштаб изображения объекта;  $\vec{S}$  - вектор перемещения зерна. Таким образом, измеряя шаг полос, можно определить величину перемещения любой точки объекта, причем направление перемещения будет перпендикулярно интерференционным; полосам. Компоненты полного вектора перемещения в декартовой системе координат будут равны  $u = S \sin \beta$ ,  $v = S \cos \beta$ , где  $\beta$  - угол наклона интерференционных полос к горизонтали. Величину горизонтального и вертикального перемещения можно также определить, измеряя расстояния  $P_x$  и  $P_y$  между соседними интерференционными полосами вдоль осей  $X$  и  $Y$  :

$$u = \lambda L / (M P_x); \quad v = \lambda L / (M P_y). \quad (3)$$

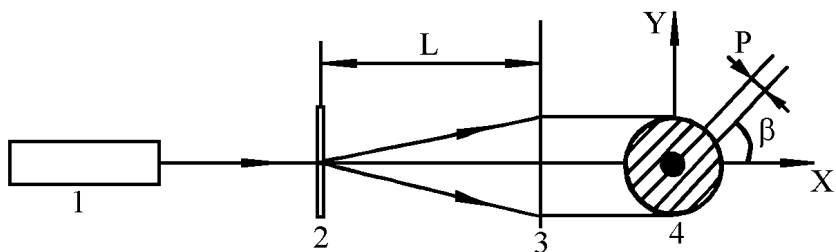


Рис. 1. 1 – лазер, 2 – спекл-интерферограмма, 3 – экран, 4 – картина полос на экране

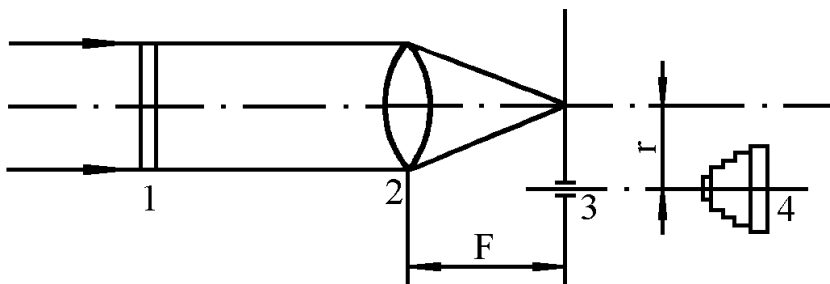


Рис. 2. 1 –спекл-интерферограмма, 2 –линза, 3 –пространственный фильтр, 4 -фотокамера

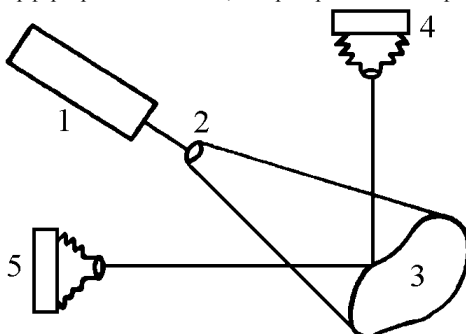


Рис. 3. 1 – лазер, 2 – линза, 3 – объект, 4, 5 - фотокамеры

Сканируя голограмму по всему полю, можно получить величины перемещения во всех точках.

Другим способом определения перемещений является метод пространственной фильтрации (рис. 2). Параллельный когерентный пучок света, пройдя через спекл-интерферограмму, попадает на линзу, в фокальной плоскости которой установлена точечная диафрагма. На экране, размещенном за диафрагмой, наблюдается картина интерференционных полос, каждая из которых будет соответствовать проекции вектора перемещения на линию, соединяющую центр диафрагмы с осью оптической системы. Цена полосы в этом случае вычисляется по формуле:

$$\Delta S = \frac{\lambda F}{M \cdot r}, \quad (4)$$

где  $F$  - фокусное расстояние;  $r$  - расстояние от оси оптической системы до точечной диафрагмы. Устанавливая диафрагму вдоль осей  $X$  и  $Y$ , можно получить значение горизонтальных и вертикальных перемещений. Из формулы видно, что при удалении центра диафрагмы от оси чувствительность метода возрастает.

Для получения трех компонент вектора перемещений необходимо получить две спекл-интерферограммы, используя две фотокамеры. Если камеры расположены так, как показано на рис. 3, то по интерферограмме, полученной с помощью камеры 4, можно определить перемещения  $u$  и  $v$ , а по другой интерферограмме (камера 5) –  $v$  и  $w$ . Значения перемещения  $v$ , вычисленные по обеим интерферограммам, могут служить мерой точности полученных результатов.

Спекл-интерферометрию успешно используют также для анализа вибраций. Для наблюдения форм колебаний диффузно-отражающих объектов луч лазера разделяют на опорный и предметный лучи, которые образуют видимую зернистую картину на изображении поверхности. Вибрации объекта вызывают размывание зерен в районах пучностей и остаются отчетливыми в узлах. Результирующая картина ясно указывает узловые линии или области данной формы колебаний. В отличие от метода реального времени спекл-интерферометрия не требует долговременной стабильности объекта и обеспечивает более яркое изображение. Это используют для быстрого и достаточно точного налаживания экспериментальной оснастки (для расположения фиксаторов объекта в узловых точках, настройки возбудителей колебаний и т.п.).

Отметим, что если фотокамеру сфокусировать на точечный источник лазерного излучения, которым освещается объект, то на спекл-интерферограмме будут зарегистрированы только перемещения, вызванные жестким поворотом объекта.

Достоинством метода спекл-интерферометрии является то, что он позволяет измерять перемещения от нескольких микрометров до нескольких миллиметров и не предъявляет жестких требований к виброзащите.

#### 4. ОПИСАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Для выполнения работы используется оптическая схема, изображенная на рис. 4 (для фазовых объектов) и на рис. 5 (для непрозрачных объектов). Порядок сборки и юстировки оптической схемы тот же, что и в первой работе. Отличие заключается в том, что необходимо предусмотреть возможность нагружения объекта перед второй экспозицией.

#### 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Собрать оптическую схему для регистрации двухэкспозиционной голограммы фазового или амплитудного объекта.

5.2. Провести запись голограммы объекта в исходном состоянии.

5.3. Осуществить нагружение объекта и на той же фотопластинке записать голограмму объекта в нагруженном состоянии.

**НАГРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТА ПРОИЗВОДИТЬ МАКСИМАЛЬНО ПЛАВНО, ЧТОБЫ НЕ ДОПУСТИТЬ ЕГО СМЕЩЕНИЯ. ФОТОПЛАСТИНКА ПРИ ЭТОМ ОСТАЕТСЯ НА МЕСТЕ.**

5.4. Обработать фотопластинку согласно инструкции.

5.5. Восстановить интерферограмму, зарисовать ее и качественно оценить распределение напряжений в нагруженном объекте.

#### 6. ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по работе должен включать:

1. Оптическую схему, использованную в работе.
2. Время экспозиций, тип фотоматериала, характер нагружения объекта.
3. Рисунок и интерпретацию интерферограммы.
4. Ответы на контрольные вопросы (устно).

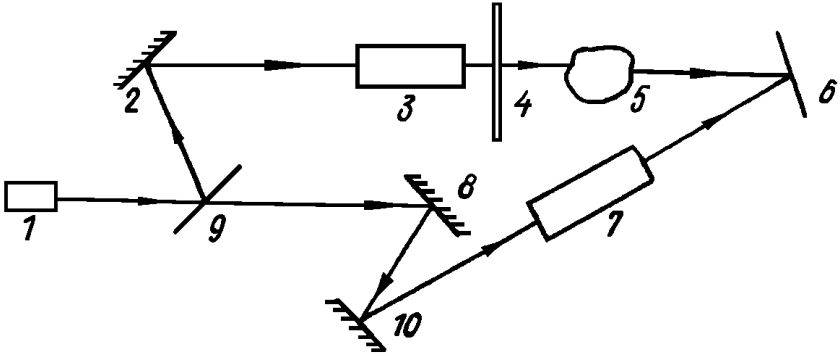


Рис. 4. 1 – лазер; 2,8,10 – зеркала; 3,7 – расширители; 4 – рассеиватель; 5 – фазовый объект; 6 – фотопластинка; 9 - делитель

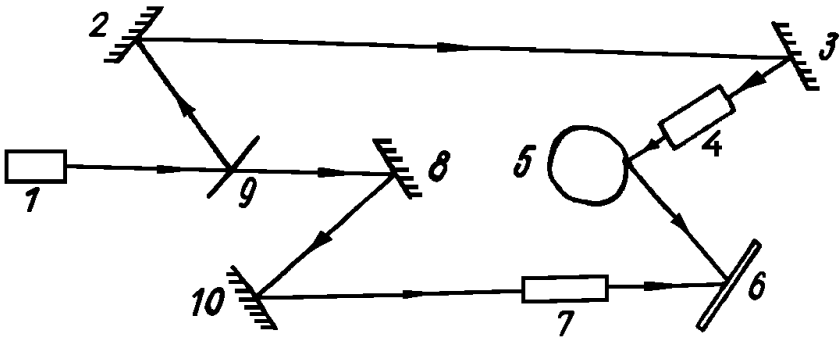


Рис. 5. 1 – лазер; 2,3,8,10 – зеркала; 4,7 – расширители; 5 – амплитудный объект; 6 – фотопластинка; 9 - делитель

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается основной принцип голографической интерферометрии?
2. Перечислите наиболее распространенные методы голографической интерферометрии. В чем заключается суть каждого из них?
3. В чем сходство методов стробоскопической и двухэкспозиционной голографической интерферометрии?
4. Назовите основные практические применения голографической интерферометрии.
5. В чем заключается метод спекл-интерферометрии?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Дуденкова В.В. Оптическая голография : учебное пособие. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2015. URL: <http://sun.tsu.ru/limit/2016/000549981/000549981.pdf>
2. Комоцкий В.А. Основы когерентной оптики и голографии : конспект лекций. Москва : Российский университет дружбы народов, 2011. URL: <http://sun.tsu.ru/limit/2016/000552076/000552076.pdf>
3. Кудрин А.Б., Бахтин В.Г. Прикладная голография. Исследование процессов деформации металлов. М. : Металлургия, 1988. 248 с.
4. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М. : Наука, 1988. 246 с.



*Издание подготовлено в авторской редакции*

Отпечатано на участке цифровой печати  
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 2664 от «18» июля 2017 г. Тираж 50 экз.





