

## ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМЫ И ДЕФОРМАЦИЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ\*)

И. НАГИВИНА

*Ленинградский институт точной механики и оптики*

Развитие лазерной техники и голографии открыли большие возможности для создания принципиально новых, когерентно-оптических методов исследования формы и напряженно-деформированного состояния диффузно-рассеивающих объектов. В настоящее время значительные успехи достигнуты в области разработки методов и принципов построения измерительных систем расшифровки картин в методах голографической интерферометрии и спекл-интерферометрии. В первом случае наиболее перспективным является метод двух длин волн. Однако, отсутствие требуемых регистрирующих сред, необходимость компенсации поперечного сдвига изображений ограничивают возможности широкого применения этого метода.

Методы спекл-интерферометрии и спекл-фотографии, предъявляя значительно меньшие требования к регистрирующим средам и к условиям регистрации, обеспечивают возможность регистрации и последующей обработки спекл-картин с помощью электронных методов, т.е. дает возможность автоматизировать процесс измерения.

При изучении деформаций объектов с помощью методов голографической интерферометрии и спекл-интерферометрии основные трудности возникают на этапе расшифровки интерферограмм.

Современный уровень развития методов гетеродинной обработки голографических интерферограмм и спекл-картин дает основания надеяться, что уже в ближайшем будущем будут созданы высокоэффективные, автоматизированные системы обработки интерферограмм.

Возникновение нового направления в интерферометрии (голографическая интерферометрия и спекл-интерферометрия) позволило осуществлять контроль диффузно-рассеивающих объектов с интерферометрической точностью, а также реализовать сравнение световых полей, существовавших в различные моменты времени.

\*) Praca wygłoszona na XII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa—Jadwisin, 1986.

Как уже упоминалось, методы когерентной оптики, основанные на принципах голографической интерферометрии и спекл-интерферометрии в настоящее время находят широкое применение при изучении формы поверхности, вибраций и деформаций объектов.

I. В данной работе вначале проводится краткий анализ методов голографической интерферометрии и отмечаются основные тенденции и перспективы использования их для решения практических задач, в частности, для исследования медуко-биологических объектов.

В основе голографических методов изучения формы поверхности объектов лежит возможность формирования интерференционной картины, в которой интерференционные полосы являются линиями равного уровня и представляют исследуемый объект в виде его топографической карты.

Известно три голографических метода получения топограмм объекта: метод двух источников (или метод смещенного источника), иммерсионный метод и метод двух длин волн (двухчастотный). Расстояние между секущими эквидистантными плоскостями в топографических интерферограммах соответственно определяются выражениями:

$$а) \quad \Delta h = \frac{\lambda}{2 \sin(\Theta/2)} \quad (1)$$

$$б) \quad \Delta h = \frac{\lambda}{n_1(1 + \cos \gamma_1) - n_2(1 + \cos \gamma_2)} \quad (2)$$

$$в) \quad \Delta h = \frac{\lambda \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (3)$$

В этих формулах  $\Theta$  — угол между первоначальным и последующим направлением распространения освещающего объект пучка при первой и второй экспозициях,  $\lambda$  — длина волны,  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления иммерсии при первой и второй экспозициях (иммерсионный метод), а  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — углы преломления света при соответствующих экспозициях.

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн применяемого излучения при записи первой и второй голограммы одного и того же объекта.

Как уже отмечалось, среди методов контроля формы поверхности объектов наибольшую простоту имеет метод двух длин волн. С помощью этого метода можно исследовать объекты произвольной формы, в широком диапазоне управлять шагом полос. Однако, отсутствие в ряде случаев требуемых источников света — лазеров для записи голограмм, трудоемкость методов расшифровки в значительной степени ограничивает возможности практического использования этого и других методов для контроля формы поверхности объектов.

С точки зрения регистрирующих сред наибольшие перспективы возлагаются на фототермопластические материалы. При использовании фототермопластических регистрирующих сред время получения топографической интерферограммы объекта методом двух длин волн составляет величину порядка I сек. Дальнейшее уменьшение времени получения топографической интерферограммы ограничивается фи-

зическими свойствами самой регистрирующей среды и возможностями быстрого перехода с одной длины волны на другую при записи голограммы. Кроме того, достижение предельных точностных характеристик при определении формы поверхности диффузно-рассеивающих объектов связано с необходимостью компенсации поперечного сдвига изображений, что в свою очередь накладывает ограничения на линейные размеры исследуемых объектов. В наших работах (работы аспирантов) для исследования формы и деформаций различных объектов нами был применен метод смещенного источника (Рис. 1), метод встречных пучков по Денисюку (Рис. 2) и метод проекции полос (Рис. 3).

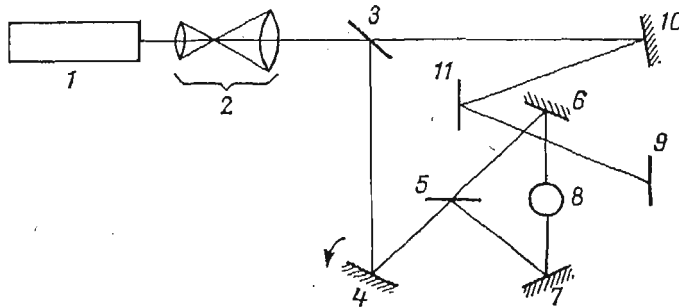


Рис. 1. Оптическая схема регистрации интерферограмм методом смещенного источника; 1 — лазер; 2 — коллиматор; 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11 — отражающие или полупрозрачные зеркала, 8 — объект.

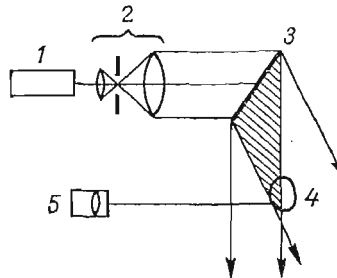


Рис. 2. Метод проекции полос для получения топографических карт диффузно-отражающих объектов; 1 — лазер, 2 — коллиматор, 3 — голограмма, 4 — объект, 5 — фотоаппарат.

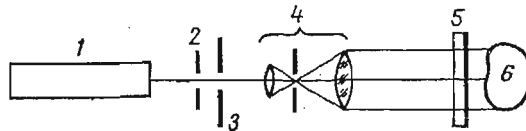


Рис. 3. Оптическая схема регистрации голографических изображений методом Ю. Н. Денисюка; 1 — лазер, 2 — диафрагма, 3 — фотозатвор, 4 — коллиматор, 5 — голограмма, 6 — объект.

II. Остановимся на проблемах, которые решались при исследованиях различных параметров медико-биологических объектов. Мы ставили следующие задачи: — получить объемную оптическую информацию об объекте и создать таким

образом реальную картину объекта для обеспечения, например, музеев учебных институтов соответствующими голограммами-экспонатами;

— исследовать топографические карты и деформацию сложных анатомических препаратов костных тканей человека или других органов;

— исследовать изменение фотоупругих свойств искусственных и препарированных артерий (сосудов) человека с применением аппарата искусственного кровообращения (эта проблема в настоящей работе не рассматривается).

Первая задача была осуществлена с помощью использования записи голограмм в толстослойных эмульсиях по схеме Ю. Н. Денисюка. Реальное изображение, как известно, обладает объемностью, глубиной изображения, игрой бликов, параллаксом; поэтому это изображение соответствует точной копии диффузно-отражающего объекта. Такие изображения — „образы” объектов являются, по существу, оптическими эквивалентами объекта, т.е. имеют такую структуру, которая воздействует на глаз человека так, как и собственно объект.

В настоящее время в СССР (в Ленинграде и других городах) созданы музеи голографических экспонатов, которые дают представление об этой уникальной возможности голографии: создается сильное и эффектное зрительное впечатление.

Для количественного исследования топографических карт диффузно-отражающих объектов использовались оптическая установка смещенного источника (Рис. 1) и оптическая схема проекции полос (Рис. 2), а для изучения деформаций костных тканей — схема Денисюка (Рис. 3).

Обратимся к результатам исследований формы и деформации медико-биологических объектов. Современная морфологическая наука требует точной количественной информации о деформированном состоянии и изменчивости различных органов под влиянием функциональных и экстремальных воздействий. Эти вопросы необходимо рассматривать в топографической анатомии и экспериментальной хирургии.

Для изучения топографии поверхностей костных тканей или деформаций экспериментально были освоены два указанных выше метода. В обоих случаях объект (как целое) при первой и второй экспозициях остается неподвижным. Для исследования деформаций интерференционное поле, восстановленное с голограммы, интерферирует с измененным полем при деформации объекта или с коллимированным фронтом лучей, распространяющимся под другим углом. Таким образом осуществляется когерентное сложение объектных волновых полей. При изучении контурных карт обеспечивалось постоянство шага интерференционных полос. В соответствии с инвариантностью формы поверхности интерферограммы позволяют проводить точное описание формы поверхности или ее деформации. Последнее имеет важное значение при изучении индивидуальной и возрастной изменчивости различных органов.

Для изучения деформации костных тканей черепной коробки и выявления механизмов образования трещин и переломов было разработано специальное нагрузочное приспособление, исключаящее смещение объекта при возрастании нагрузки.

Для удобства расшифровки интерферограмм создано приспособление, позвол-

яющее совместить исследуемую точку восстановленного изображения с точкой пересечения оптических осей восстанавливающего пучка и системы наблюдения. Можно было проводить счет полос и определять  $\Delta l$  — расстояние между реперными точками поверхности\*.

В качестве примера приводим результаты по изучению деформации основания черепной коробки в широком диапазоне дозированной нагрузки. На рис. 4 (а, б) представлены интерферограммы при достаточно высоких нагрузках. При сравнительно малых нагрузках до 15 кг (физиологическая нагрузка) возникает деформация отдельных участков, было четко выражено смещение костных элементов относительно друг друга за счет уплотнения межкостных швов; при нагрузках

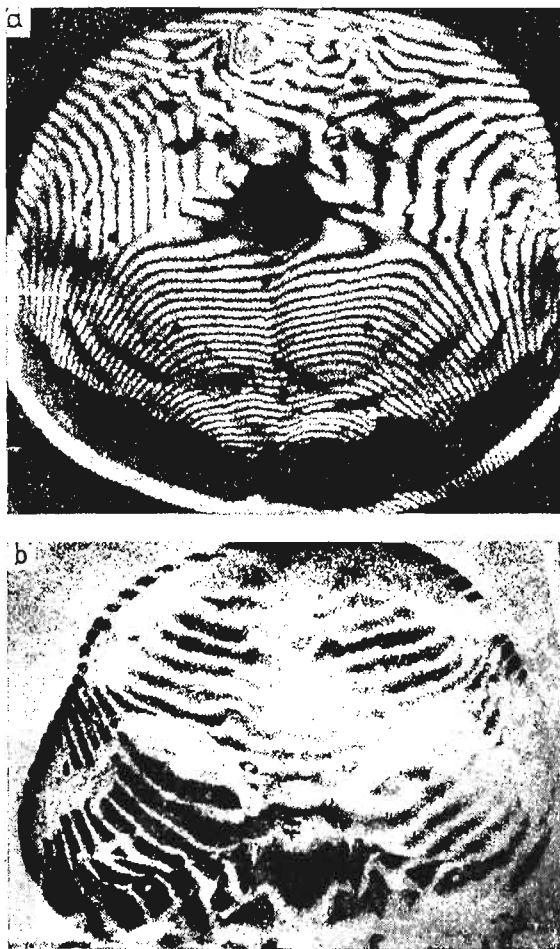


Рис. 4а. Интерферограмма деформации основания черепной коробки при изменении нагрузки от 60 до 65 кг.

Рис. 4б. Интерферограмма деформации основания черепной коробки при изменении нагрузки от 93 до 95 кг.

\* ) Метод расшифровки интерференционных полос см. в разделе III.

20 - 30 кг и выше появляются микротрещины в области крыльев основной кости и верхней стенки глазниц. Рис. 4а. При увеличении нагрузки до 90 кг и несколько выше (Рис. 4б) имеет место монолитное образование. Образование трещин и переломов начинается после упругой деформации отдельных костей при нагрузках 100 кг и выше. Деформации отдельных участков при малых нагрузках определяются величиной около  $2 \cdot 10^{-4}$ .

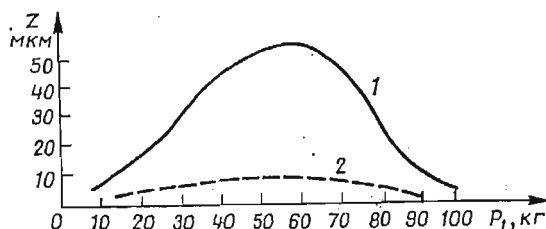


Рис. 4в. Зависимость проекций перемещений по X и Z точек черепной коробки при различных нагрузках.

На рис. 4в показаны зависимости величин проекций перемещений точек основания черепа при различных нагрузках. Как видно из рисунка, при увеличении нагрузки взаимные смещения заметно увеличиваются. Однако, начиная с нагрузок 60 кг, резервы смещения иссякают и получается более монолитное образование (рис. 4б).

Выявления закономерностей деформаций черепной коробки могут быть использованы для прицельной рентгенографии и представляют интерес для травматологов, патофизиологов и в судебно-медицинских исследованиях.

III. Обратим внимание на эксперименты по получению контурных карт поверхностей твердых тел, которые позволяют измерять отступления формы поверхности от заданной (или нормальной) с весьма большой точностью. Анализ обобщенного уравнения голографической интерферограммы при условии, что координаты точек исследуемой поверхности не смещаются ( $r_1 = r_2 = r$ ), позволил нам использовать модифицированный вариант смещенного источника. Освещение объекта производилось с двух противоположных сторон. Между экспозициями направление опорного пучка изменялось на угол  $\theta$ , который определяет шаг полос. Минимальный шаг полос  $\Delta h$  выбирается из учета среднего размера микронеровностей и критерия Релея:  $\Delta h_{cr} < 0,125 \Delta h$ . Количественные данные дают возможность построить контур диффузноотражающих объектов, определить радиус кривизны при заданной форме поверхности или определить уравнение поверхности.

Оказалось также целесообразным использовать два коллимированные волновые фронта, пересекающиеся под некоторым углом, и применить метод проекции полос. Тогда на этапе восстановления возникают полосы с эквидистантным шагом. Помещая объект в интерференционное поле, можно получить топографическую карту объекта.

Экспериментально получены контурные карты ряда механических и медико-биологических объектов. В частности, метод проекции полос (Рис. 2) был исполь-

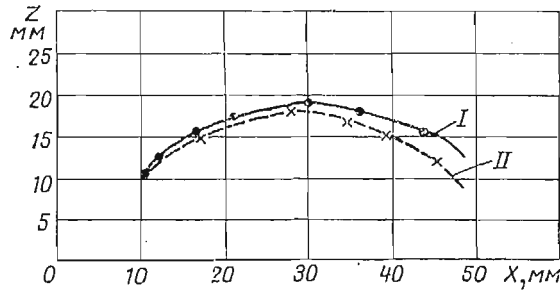


Рис. 5. Смещение зубного ряда в процессе ортодонтического лечения; 1 — исходное положение, 2 — после коррекции

зован при контроле коррекции расположения элементов зубного ряда в процессе ортодонтического лечения. На рис. 5 дана картина расположения зубного ряда до и после проведения лечения.

IV. Важным этапом интерферометрического исследования является разработка методов расшифровки голографических интерферограмм при высоких требованиях к точности измерений. При исследовании деформаций целью расшифровки является определение вектора перемещения точек поверхности  $r = r_2 - r_1$ . Наиболее распространенный способ расшифровки состоит в определении трех проекций вектора смещения при использовании трех уравнений. Метод Е. Б. Александрова и А. М. Бонч-Бруевича при этом фиксируют направления наблюдения. Разность фаз тогда выражается в виде:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_s - n_i) \quad N\lambda = r(n_s - n_i)$$

где  $n_s$  — единичный вектор освещения.  $n_i$  — единичный вектор наблюдения,  $N$  — порядковый номер интерференционной полосы. Для определения  $r$  наблюдают и отсчитывают число интерференционных полос  $N$ , проходящих через некоторую зону в каждой исследуемой точке поверхности при изменении  $n_i$ . Тогда можно записать три уравнения:

$$\begin{aligned} \pm N_1 \lambda &= r(n_{2s} - n_{1s}) \\ \pm N_2 \lambda &= r(n_{4s} - n_{3s}) \\ \pm N_3 \lambda &= r(n_{6s} - n_{5s}) \end{aligned} \quad (5)$$

Однако, для определения знака целесообразно использовать четвертое уравнение, чтобы знать не только величину, но и направление вектора. Это особенно важно при исследовании диффузных объектов сложной формы. Тогда

$$\pm N_4 \lambda = r(n_8 - n_7) \quad (6)$$

Решением этих систем уравнений можно определить также направление  $r$ . Как уже отмечалось, было разработано специальное приспособление ГИД-I, позволяющее совместить исследуемую точку восстановленного изображения с точкой пересечения оптических осей пучка  $n_i$  (ось OZ), векторов  $n_s$  и оси вращения системы наблюдения (ось OY).

Существенно, что восстанавливающий пучок света направлен по нормали к голограмме, что позволяет при любом повороте голограммы вокруг оси  $OZ$  получать восстановленное изображение объекта неискаженным, а исследуемая точка не смещается с оптической оси системы наблюдения (зрительная труба). Для изменения угла наблюдения в этом случае достаточно повернуть голограмму относительно оси  $OZ$  на некоторый угол.

Это устройство позволило измерить значение вектора  $r$  и деформацию  $\varepsilon = \Delta l/l$ , где  $\Delta l$  — изменение расстояния между фиксированными точками поверхности,  $l$  — начальное расстояние между точками. Наибольшее смещение, которое может быть измерено, ограничивается пространственной частотой полос.

Значительно большие возможности дают гетеродинные методы, позволяющие при высокой точности измерений автоматизировать процесс обработки информации. Сущность гетеродинных методов заключается в формировании синусоидального электрического сигнала, в фазе которого содержится информация о величине вектора смещения; высокие точностные характеристики обусловлены возможностью использования электронной техники для считывания информации с интерференционной картины. Гетеродинная схема расшифровки предполагает наличие разностной частоты интерферирующих световых пучков, лежащей в радиодиапазоне. В результате интерференционная картина „бежит“ мимо фотоприемника, что и приводит к формированию на выходе фотоприемника синусоидального электрического сигнала. Метод гетеродинной голографической интерферометрии известен как наиболее точный.

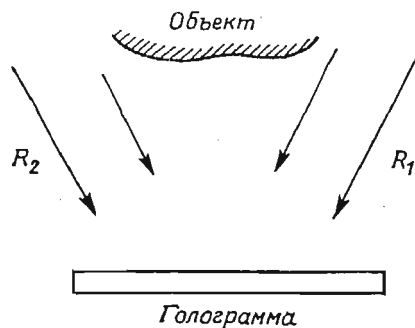


Рис. 6. Схема принципа гетеродинной интерферометрии

Традиционный принцип реализации метода изображен на рис. 6. При записи голограммы используются два различных опорных пучка  $R_1$  и  $R_2$  с одинаковой оптической частотой  $\omega_0$ . Первая экспозиция (с невозмущенным объектом) производится с помощью опорного пучка  $R_1$ , вторая экспозиция при изменении состояния объекта — с опорным пучком  $R_2$ .

При восстановлении частоты пучков  $R_1$  и  $R_2$  сдвигаются на величины —  $\Omega/2$  и  $+\Omega/2$ . Соответственно сдвигаются частоты восстановленных интерферирующих волновых фронтов\*). Поэтому интенсивность излучения, идущего от

\*) Подробно о методе голографической гетеродинной интерферометрии см. в [5].



голограммы, меняется во времени с частотой биений  $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ , лежащей в радиодиапазоне. На выходе фотоприемника формируется синусоидальный сигнал, фаза которого может быть измерена с помощью электронной техники.

Применение гетеродинного интерферометра сдвига позволяет построить схему расшифровки голографических интерферограмм лишь с одним опорным пучком [2]. Схема расшифровки изображена на рис. 7. Интерферометр сдвига образован

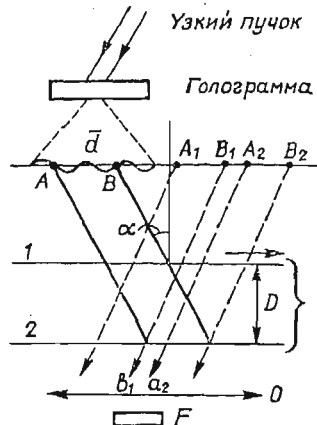


Рис. 7. Интерферометр сдвига, предназначенный для обработки интерферограмм и спекл-фотографий;  $A, B$  — соответственные элементы спекл-интерферограммы, 1, 2 — дифракционные решетки,  $\alpha$  — угол Брегга,  $A_1$  и  $B_1$ ,  $A_2$  и  $B_2$  — мнимые изображения точек  $A$  и  $B$ ,  $\vec{d}$  — вектор смещения спекл-интерферограммы между экспозициями,  $O$  — объектив,  $F$  — фотоприемник,  $D$  — расстояние между решетками.

двумя дифракционными решетками 1 и 2. Дифракционные решетки строят две пары мнимых изображений соответственных элементов  $A$  и  $B$ , восстановленного с голограммы изображения объекта. Смещение соответственных элементов определяется искомым вектором  $d$ .

Можно показать, что при выполнении условия  $d = 2Dt \operatorname{tg} \alpha$ , где  $\alpha$  — угол Брегга, Лучи  $a_2$  и  $b_1$ , исходящие из точек  $A_2$  и  $B_1$ , совпадут в пространстве. В плоскости фотоприемника  $F$  будут наблюдаться интерференционные полосы, образованные в результате интерференции лучей  $a_2$  и  $b_1$ . Полосы, образованные в результате интерференции всех других пар лучей, изображенных на рисунке, локализируются вне плоскости фотоприемника и не регистрируются.

Для осуществления принципа гетеродинирования необходимо сместить частоту одного из интерферирующих лучей. С этой целью решетка 1 сканирует относительно решетки 2 по направлению, отмеченному стрелкой. Частоты интерферирующих лучей будут отличаться на величину  $\Omega = 2\pi\delta/t$ , где  $\delta$  — скорость движения решетки 1,  $t$  — период штрихов решетки.

Диапазон и погрешность измерений можно оценить, используя выражение для разности фаз соответственных лучей, прошедших интерферометр сдвига. Теоретический анализ показывает, что можно производить измерения вектора смещения величиной до 7 мм с точностью не хуже 1/100 полосы.

Таким образом, метод гетеродинной голографической интерферометрии позволяет производить измерения с очень большой точностью. Однако, сложность регистрации и расшифровки интерферограмм, повышенные требования к виброустойчивости оптической схемы делают применение отмеченного метода достаточно сложным и не всегда возможным. Хорошо известный метод спекл-фотографии отличается своей простотой и свободен от этих недостатков. Поэтому развитие принципа гетеродинной интерферометрии нужно видеть в методе спекл-фотографии, т.к. будут сочетаться простота регистрации и точность измерений.

Для расшифровки спекл-фотографий можно использовать схему, приведенную на рис. 7, заменив голограмму спекл-фотографией и поместив последнюю в область формирования действительного изображения, восстановленного с голограммы. Работа устройства по расшифровке спекл-фотографий аналогична рассмотренному выше случаю с голограммой. Точность измерений при этом может быть 0,01 полосы. Однако достижение такой точности связано с высокими требованиями к юстировке элементов устройства. Чувствительность устройства для расшифровки спекл-фотографий определяется углом  $\varphi$  между направлением наблюдения интерференционных полос и направлением освещения, как это видно из рис. 8. Смещение фазы равно

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi.$$

Например, при  $\varphi = 0,1$  рад. изменение разности фаз на  $2\pi$  соответствует изменению вектора смещения  $d$  на 6 мкм.

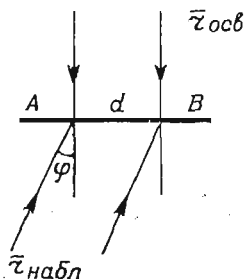


Рис. 8. К вопросу о чувствительности метода расшифровки спекл-фотографий.

Необходимо отметить, что в работе активное участие принимали сотрудники Т. А. Ильинская, В. В. Хопов, В. Л. Казак.

#### Литература

1. Ч. Вест, *Голографическая интерферометрия*, М.: Мир, 1982.
2. И. М. НАГИБИНА, В. В. Хопов, *Автоматизированная обработка голографических интерферограмм при определении деформаций диффузно-отражающих объектов*, Изв. вузов. Приборостроение, 1983, т. 26, № 2, с. 80 - 84.
3. И. М. НАГИБИНА, В. В. Хопов, *Гетеродинная спекл-интерферометрия*, *Опт. и спектр.*, 1983, т. 55, № 4, с. 762 - 764.

4. О. П. Большаков, В. Л. Казак, Т. А. Ильинская, *Исследование процесса деформации основания черепа методом голографической интерферометрии*, Архив анатомии, гистологии и эмбриологии. 1982, т. 88, № 7, с. 18 - 24.
5. K. DANDLIKER, B. B. INEICHEN, F. MOTTIER, *Opt Commun.* 9, 412, 1973.

### Streszczenie

#### METODY HOLOGRAFICZNE BADAŃ KSZTAŁTU I ODKSZTAŁCEŃ CIAŁ STAŁYCH ORAZ METODY ANALIZY INTERFEROGRAMÓW

W pracy opisano metody interferometrii holograficznej i ich zastosowanie w badaniu kształtów i odkształceń obiektów biomedycznych. Opisane są metody analizy interferogramów holograficznych i interferencji plamkowej. Specjalną uwagę skupiono na heterodynamicznej technice analizy interferogramów.

### Summary

#### HOLOGRAPHIC METHODS FOR INVESTIGATION OF THE SHAPES AND DEFORMATION OF SOLID BODIES AND METHODS OF ANALYSIS OF INTERFEROGRAMS

In this article a few problems of holographic interferometry methods applied to the investigation of the shape and deformations of the medicine-biological objects are discussed. The possible methods of deciphering interferograms and spectrophotographs are described. A special attention is given to the techniques of heterodyning for the interferograms processing. The optical diagrams are also given and certain results of the experimental research.

*Praca wpłynęła do Redakcji dnia 1 czerwca 1987 roku*

---