

УДК 535.4:681.7

© Е. Е. Майоров, Г. А. Костин, Т. А. Черняк, 2023

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИФфуЗНО ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ

В работе рассмотрена реализация метода спекл-фотографии для контроля диффузно отражающих поверхностей объектов. Оптические методы контроля позволяют получать высокоточную и достоверную информацию об изучаемых объектах, поэтому работа перспективна и актуальна. В работе поставлена задача и определены метод и объекты исследования. Приведены внешний вид и принципиальная схема экспериментальной установки. Получены зависимости проекции d_x и d_y от координаты X в плоскости спеклограммы. Выявлено, что величина отклонений смещения от среднего значения для $d = 5$ мкм не превышает 0.1 мкм, для $d = 300$ мкм — 1.5 мкм. Приведены фотографии спекл-интерференционных полей при критической величине смещения. В результате эксперимента сравнительный анализ данных показал, что при симметричном освещении спеклограмм двумя световыми пучками точность измерений увеличивается в разы. Получен значимый результат, который свидетельствует о конкурентоспособности отечественных голографических фотоматериалов на основе галогенидов серебра к импортным фотоматериалам.

Кл. сл.: спеклограмма, фазоизмерительная установка, диффузор, фотопластинка, световой пучок, фурье-образ, лазер, растр

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества и надежности современных методов и технических средств измерений в машиностроении, оптическом приборостроении, химических исследованиях неразрывно связано с расширением и совершенствованием информационной и научной базы экспериментальных исследований [1, 2]. Изучение химических, физических и оптических свойств исследуемых объектов всегда являлось важной задачей научно-технического комплекса [3, 4]. Для решения указанной задачи оптическим и оптико-электронным методам и средствам отведена значимая роль. Эти методы позволяют получать высокоточную и достоверную информацию об изучаемых объектах. Оптические методы контроля являются бесконтактными методами измерений. Их преимущества над другими методами состоят в том, что они высокопроизводительны, имеют хорошую виброзащиту и лишены механического и химического воздействия на изучаемый объект. А значит, использование оптических методов снимает ограничения по классу измеряемых образцов и дает возможность решать различные задачи динамического характера [5, 6].

В настоящее время в научной практике успешно применяют метод спекл-фотографии [7, 8]. Этот метод используется для исследований вибра-

ций, углов поворота, смещений и деформированного состояния поверхности. Метод имеет преимущества над методом голографической интерферометрии в том, что он прост в использовании и нет жестких ограничений к виброзащите [9]. При исследовании объектов сложной формы на метод спекл-фотографии в некоторых случаях накладывают ограничения, если высота вариации рельефа превышает диапазон измерений. Но этот метод дает возможность получить необходимую чувствительность при воспроизведении спеклограмм [10].

Анализ научно-технической литературы показал, что гетеродинные фазоизмерительные методы обработки спеклограмм имеют большой диапазон измеряемых смещений, высокую точность и чувствительность измерений. Но эти средства обработки спеклограмм не удовлетворяют метрологическими характеристиками экспериментаторов, а их функциональные возможности ограничены измерением лишь одной проекции вектора смещения [3, 6, 10].

Поэтому представляет интерес исследование поверхностей сложной формы разработанной фазоизмерительной установкой обработки спеклограмм, в которой фурье-образ смещенных спекл-структур преобразуется в электрический сигнал с использованием пространственно-частотной модуляции.

Целью работы явилась реализация метода спекл-фотографии для контроля диффузно отражающих поверхностей объектов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Используя оптический диффузор из матового стекла N-ВК7 и разработанную установку, провести измерения одной из проекций вектора смещения для выявления точности измерений установки. На экспериментальной установке получить параметры изменения фазы сигнала при перемещении спеклограмм на разных регистрирующих средах для того, чтобы оценить влияния отклонений соответствующих подложек от плоскопараллельности.

ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения эксперимента объектами исследования были плоский диффузор из матового стекла N-ВК7 и голографические фотоматериалы на основе галогенидов серебра двух производителей — российский ПФГ-03М и французский U08М.

Для экспериментальных исследований двух проекций вектора смещения и отклонений подложек от плоскопараллельности использовалась фазоизмерительная установка, внешний вид которой показан на рис. 1.

Данная фазоизмерительная установка позволяет исследовать смещения объектов со сложными формами поверхности, изучать характер деформации, а также анализировать различные отклонения, фиксируя данные на спеклограмме (фотопластинке).

На рис. 2 представлена принципиальная схема установки. На фотопластинку 6 воздействуют лучем лазера 1 (лазер ЛГ-79-1). Фотопластинка фиксировалась в металлической рамке. Рамка имела подвижки, которые давали возможность смещать ее в двух направлениях по осям OX и OZ .

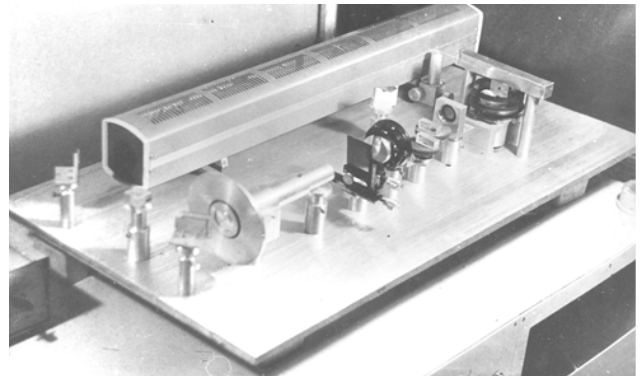


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

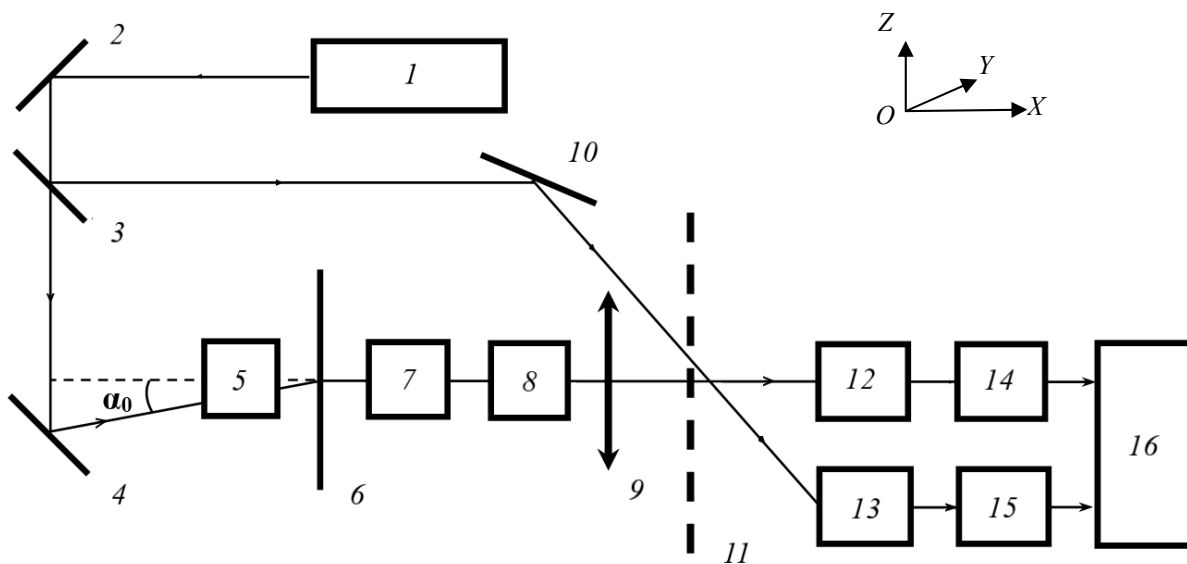


Рис. 2. Принципиальная схема расшифровки спеклограмм:

1 — лазер; 2, 3, 4, 10 — зеркала; 5, 7 — оборачивающие призмы; 6 — спеклограмма; 8 — интерферометр сдвига; 9 — линза; 11 — растр; 12, 13 — фотоприемники; 14, 15 — узкополосные усилители; 16 — фазометр

В задней фокальной плоскости линзы 9 появляется интерференция. Цилиндрический щелевой растр 11 формировал световые сигналы в плоскости фотоприемников 12, 13, которые преобразовывали эти сигналы в электрические. Далее сигналы усиливались 14, 15, и определялась их разность фазометром 16.

С помощью призмы Дове 7 производилась ориентация интерференционных полос. Интерферометр Жамена 8 служил для точного выставления периода полос.

Юстировку установки необходимо было провести для исключения "дрожания" лазерного пучка в плоскости фотопластины при вращении призмы 5. Если разность фаз сигналов в пересчете на величину смещения не превышала 0.1 мм, то установка находилась в рабочем состоянии. При анализе фотопленки использовался один пучок, а направление изменялось оборачиваемой призмой 5. Светоделитель 3 разводил на два световых пучка падающее на него излучение, тем самым формировал опорный сигнал, фаза которого постоянна. В эксперименте освещение фотопластины изменялось.

Специализированная программа управляла световым лучом, освещая спеклограмму под определенным углом падения α_0 , и в конечном итоге выводила величину смещения на монитор. С помощью интерфейса программы увеличивали α_0 , соответственно увеличивалась чувствительность измерений. Измерения проводились при α_0 , не превышающем 0.35 рад.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерение вектора смещения производилось с целью проверки точностных характеристик установки обработки спеклограмм. На рис. 3 представлены фотографии спекл-интерференционного поля при величинах смещения, близких к критическим.

На фотографии рис. 3, а, величина смещения равна 12 мкм. При уменьшении величины смещения период интерференционных полос станет меньше размера дифракционного гало. На фотографии рис. 3, б, величина смещения равна 200 мкм. Такая величина смещения также близка к критической: при увеличении смещения период интерференционных полос уменьшится и полосы будут неразличимы на фоне спекл-шума. Таким образом, в обоих случаях проведение измерений традиционным способом — непосредственным подсчетом интерференционных полос оказывается невозможным. Поэтому экспериментально исследовались перемещения объекта, которые невозможно

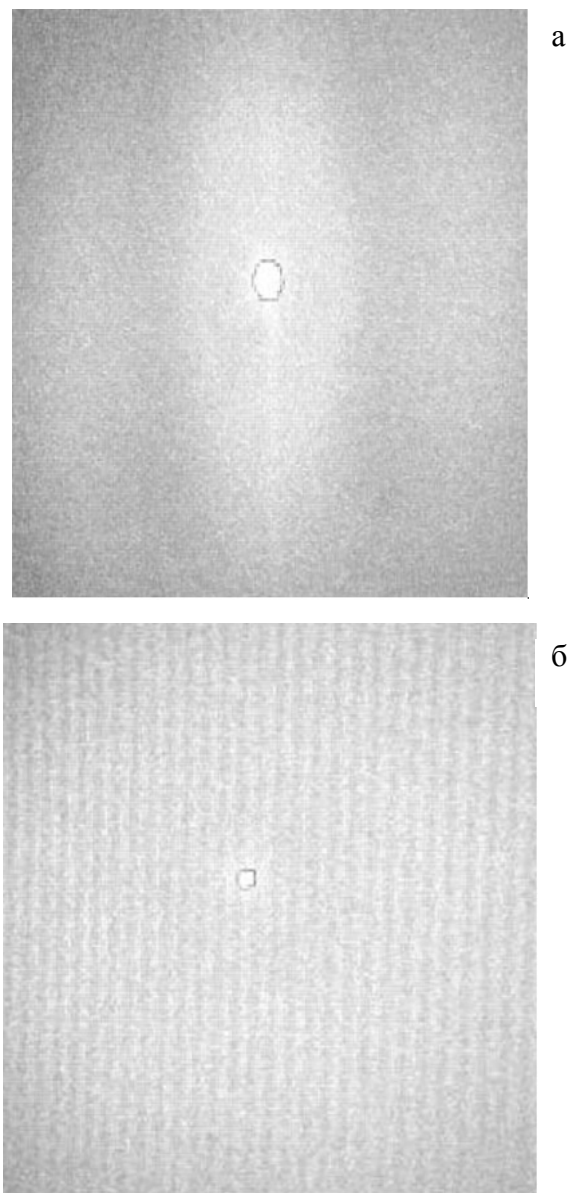


Рис. 3. Фотографии спекл-интерференционных полей при критической величине смещения.

а — при смещении 12 мкм; б — при смещении 200 мкм

измерить простым подсчетом интерференционных полос.

Регистрация величины смещения на пластинку была сделана с применением диффузора из матового стекла N-ВК7. В направлении оси OX двигался объект и фиксировались проекции d_x и d_y . На рис. 4 приведены экспериментальные результаты.

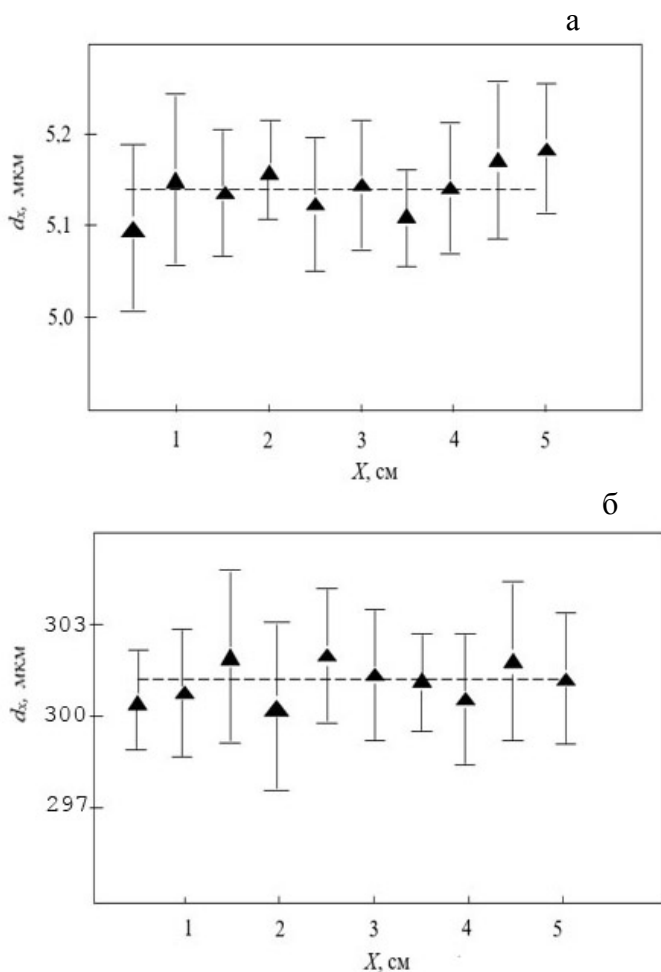


Рис. 4. Экспериментальное определение проекции d_x вектора смещения d при смещениях, близких к критическим, объекта как целого вдоль оси OX .
а — смещение объекта $d = 5 \mu\text{м}$; б — смещение $d = 200 \mu\text{м}$

Соответственно, проекции $d_x = d$, $d_y = 0$.

Выявлено, что величина отклонений смещения от среднего значения (пунктирная линия) для $d = 5 \mu\text{м}$ не превышает $0.1 \mu\text{м}$, для $d = 300 \mu\text{м}$ — $1.5 \mu\text{м}$.

В результате экспериментальных измерений были выявлены отклонения подложек спеклограмм для фотопластинок U08M и ПФГ-03M. Анализировались спеклограммы, где движение их было постоянным относительно светового луча. При записанном на фотопластинку постоянном движении изменение величины смещения в анализируемой области спеклограммы равно нулю, а значит, и изменение фазы сигнала равно нулю. Итак, критерием оценки влияния отклонений подложки фотопластинки от плоскопараллельности

является изменение фазы сигнала при движении спеклограмм. Для получения результатов измерений необходимо было воздействовать на спеклограмму как одним световым пучком, так и двумя симметричными световыми пучками. Экспериментальные результаты измерений представлены на рис. 5. Испытанию подлежали ПФГ-03M и U08M, толщины подложек у которых были соответственно 2.65 мм и 1.33 мм .

Получен значимый результат, который свидетельствует о конкурентоспособности отечественных голографических фотоматериалов на основе галогенидов серебра к импортным фотоматериалам. Выявлено, что отклонения подложек ПФГ-03M и U08M не сильно отличаются друг от друга

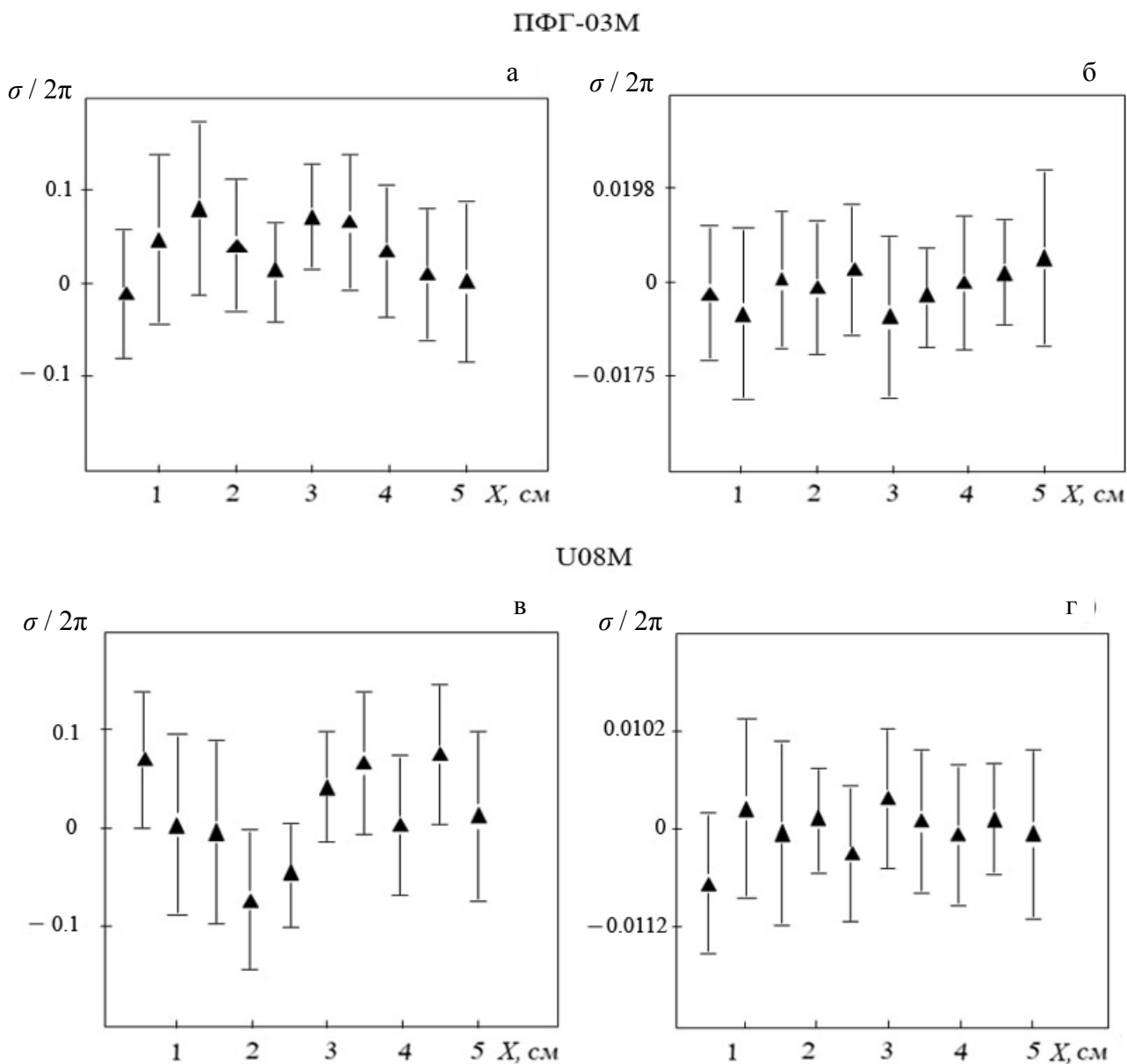


Рис. 5. Экспериментальные результаты измерений отклонений подложек спеклограмм для ПФГ-03М и U08М.

а, в — освещение одним пучком; б, г — симметричное освещение двумя пучками

и полностью удовлетворяют требованиям производственного контроля, поэтому испытуемые фотоматериалы могут использоваться практически во всех голографических применениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены фотографии спекл-интерференционных полей при критической вели-

чине смещения. Экспериментально определены проекции вектора смещения и получена погрешность измерений при $d = 5$ мкм — 0.1 мкм и $d = 200$ мкм — 1.5 мкм. На экспериментальной установке исследованы изменения фазы сигнала при перемещении спеклограмм на разных регистрирующих средах. Проведена оценка влияния отклонений соответствующих подложек от плоскопараллельности фотопластинок. Исследования разработанной фазоизмерительной установки по-

казали, что она может использоваться для расшифровки спеклограмм и удовлетворяет требованиям производственного контроля. Экспериментальные результаты могут представлять интерес для голографических практик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия / пер. с англ. под ред. Ю.И. Островского. М.: Мир, 1982. 504 с.
2. *Archbold E., Ennos A.E.* Displacement measurement from double-exposure laser photographs // *Optica Acta*. 1972. Vol. 19, no. 4. P. 253–271. DOI: 10.1080/713818559
3. *Rastogi P.K., Jacquot P.* Speckle metrology techniques: a parametric examination of the observed fringes // *Optical Engineering*. 1982. Vol. 21, no. 3. DOI: 10.1117/12.7972924
4. *Франсон М.* Оптика спеклов / пер. с франц. под ред. проф. Ю.И. Островского. М.: Мир, 1980. 171 с.
5. *Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Шерстобитова А.С.* Исследование оптико-электронной системы расшифровки голографических интерферограмм // *Оптический журнал*. 2013. Т. 80, № 3. С. 47–51. URL: <http://opticjourn.ru/vipuski/770-opticheskij-zhurnal-tom-80-03-2013.html>
6. *Клименко Н.С.* Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 224 с.
7. *Цыганкова Г.А., Майоров Е.Е., Черняк Т.А., Константинова А.А., Машек А.Ч., Писарева Е.А.* Исследование разработанного интерферометра поперечного сдвига для настройки интерференционных полос при обработке интерферограмм // *Приборы*. 2021. № 2. С. 20–25.
8. *Rastogi P.K., Barillot V., Kaufmann G.H.* Comparative phase shifting holographic interferometry // *Applied Optics*. 1991. Vol. 30, no. 7. P. 722–728. DOI: 10.1364/AO.30.000722
9. *Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Хохлова М.В., Дагаев А.В., Гулиев Р.Б., Таюрская И.С.* Экспериментальное определение элементарного смещения в разработанной оптико-электронной системе контроля голографических объектов // *Известия тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. Вып. 12. С. 200–205. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50128359>
10. *Майоров Е.Е., Колесниченко С.В., Константинова А.А., Машек А.Ч., Писарева Е.А., Цыганкова Г.А.* Исследование флуктуаций фазы выходного сигнала системы фазовых измерений // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2021. № 9. С. 1–6. DOI: 10.25791/pribor.9.2021.1287

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург (Майоров Е.Е.)

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург (Костин Г.А., Черняк Т.А.)

Контакты: *Майоров Евгений Евгеньевич*, tajogov_ee@mail.ru

Материал поступил в редакцию 18.02.2023

IMPLEMENTATION OF THE SPECKLE PHOTOGRAPHY METHOD FOR THE CONTROL OF DIFFUSELY REFLECTING SURFACES OF OBJECTS

E. E. Maiorov¹, G. A. Kostin², T. A. Chernyak²

¹*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP), Saint Petersburg, Russia*

²*Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia*

The paper considers the implementation of the speckle photography method for monitoring diffusely reflective surfaces of objects. Optical control methods make it possible to obtain highly accurate and reliable information about the objects under study, so the work is promising and relevant. The work sets the task and defines the method and objects of research. The appearance and schematic diagram of the experimental setup are given. The dependences of the projections d_x and d_y on the X coordinate in the specklogram plane are obtained. It was revealed that the deviation of the displacement from the mean value for $d = 5 \mu\text{m}$ does not exceed $0.1 \mu\text{m}$, and for $d = 300 \mu\text{m}$ it is $1.5 \mu\text{m}$. Photographs of speckle interference fields at a critical displacement are shown. As a result of the experiment, a comparative analysis of the data showed that when the specklograms are symmetrically illuminated by two light beams, the measurement accuracy increases many times over. A significant result has been obtained, which indicates the competitiveness of domestic holographic photographic materials based on silver halide compared to imported photographic materials.

Keywords: specklogram, phase measuring device, diffuser, photographic plate, light beam Fourier image, laser, raster

INTRODUCTION

Improving the quality and reliability of modern methods and technical measuring instruments in mechanical engineering, optical instrumentation, and chemical research is inextricably linked with the expansion and improvement of the information and scientific base of experimental studies [1, 2]. The study of the chemical, physical, and optical properties of objects has always been an important task for the scientific community [3, 4]. To solve this problem, optical and optoelectronic methods and means play a significant role. These methods make it possible to obtain highly accurate and reliable information about the objects under study. Optical control methods are non-contact measurement methods. Their advantage over other methods is that they are highly productive, have good vibration protection, and are devoid of mechanical and chemical effects on the object under study. This means that the use of optical methods removes restrictions on the class of measured samples and makes it possible to solve various problems of a dynamic nature [5, 6].

At present, the method of speckle photography is successfully used in scientific practice [7, 8]. This method is used to study vibrations, rotation angles, displacements, and the deformed state of the surface. The method has advantages over the holographic interferometry method in that it is easy to use and there are no strict requirements on vibration protection [9].

When studying objects of complex shape, the speckle photography method is limited in some cases if the height of the relief variation exceeds the measurement range. But this method makes it possible to obtain the necessary sensitivity when reproducing specklograms [10].

The analysis of scientific and technical literature has shown that heterodyne phase-measuring methods for specklogram processing have a large range of measured displacements, high accuracy and sensitivity of measurements. But these means of processing specklograms do not satisfy the metrological characteristics of experimenters, and their functionality is limited to measuring only one projection of the displacement vector [3, 6, 10].

Therefore, it is of interest to study the surfaces of a complex shape developed by a phase measuring device for processing specklograms, in which the Fourier transform of displaced speckle structures is converted into an electrical signal using space-frequency modulation.

The aim of the work was to implement the method of speckle photography for the control of diffusely reflective surfaces of objects.

PROBLEM STATEMENT

Using an N-BK7 matte glass optical diffuser and the developed setup, measure one of the projections of

the displacement vector to determine the measurement accuracy of the setup.

On the experimental setup, obtain the parameters of the change in the phase of the signal when moving specklograms on different recording media in order to evaluate the effects of deviations of the corresponding substrates from plane parallelism.

OBJECT AND METHOD OF RESEARCH

For the experiment, the objects of study were a flat diffuser made of matte glass N-BK7 and holographic photographic materials based on silver halide from two manufacturers — Russian ПФГ-03М and French U08М.

For experimental studies of two projections of the displacement vector and deviations of the substrates from plane parallelism, a phase-measuring setup was used, the appearance of which is shown in Fig. 1.

Fig. 1. Appearance of the experimental plant

This phase-measuring setup enables the study of the displacement of objects with complex surface shapes, the nature of deformation, and various deviations by recording data on a specklogram (photographic plate).

Fig. 2 shows a schematic diagram of the setup. The photographic plate 6 is exposed to the laser beam 1 (laser ЛЛ-79-1). The photographic plate was fastened into a metal frame. The frame was designed in such a way as to be able to move in two directions along the OX and OZ axes.

Fig. 2. Schematic diagram of specklogram decoding:
1 — laser; 2, 3, 4, 10 — mirrors; 5, 7 — inverting prisms; 6 — specklogram; 8 — shift interferometer; 9 — lens; 11 — raster; 12, 13 — photodetectors; 14, 15 are narrow band amplifiers; 16 — phasometer

Interference appears in the back focal plane of the lens 9. A cylindrical slit raster 11 formed light signals in the plane of photodetectors 12, 13, which converted these signals into electrical ones. Further, the signals were amplified 14, 15, and their difference was determined by a phasometer 16.

Using a Dove prism 7, the interference fringes were oriented. Jamin's interferometer 8 served to accurately set the period of the fringes.

The setup had to be adjusted in order to exclude laser beam "jitter" in the plane of the photographic plate during the rotation of prism 5. If the phase difference of the signals in terms of displacement did not exceed 0.1 mm, then the setup was in working condition.

In the analysis of photographic film, one beam was used, and the direction was changed by a reversible prism 5. Beam splitter 3 separated the radiation incident on it into two light beams, thereby forming a reference signal, the phase of which is constant. In the experiment, the illumination of the photographic plate was changed.

A specialized program controlled the light beam, illuminating the specklogram at a certain angle of incidence α_0 , and finally displaying the deviation value on the monitor. With the help of the program interface, α_0 was increased, and the measurement sensitivity increased accordingly. The measurements were carried out at α_0 not exceeding 0.35 rad.

EXPERIMENTAL RESULTS

The displacement vector was measured in order to check the accuracy characteristics of the specklogram processing setup. Fig. 3 shows photographs of the speckle interference field at displacement values close to critical.

Fig. 3. Photographs of speckle interference fields at critical displacement value.
а — at a displacement of 12 μm ; б — at a displacement of 200 μm

In the photograph Fig. 3, а, the displacement value is 12 μm . As the displacement decreases, the period of the interference fringes becomes smaller than the size of the diffraction halo. In the photograph Fig. 3, б, the displacement value is 200 μm . This value is also close to the critical one: as the displacement increases, the period of the interference fringes will decrease, and the fringes will be indistinguishable against the background of speckle noise. Thus, in both cases, it is impossible to carry out measurements in the traditional way by directly counting the interference fringes. Therefore, the movements of the object, which cannot be measured by simple counting of interference fringes, were experimentally studied.

A record of the displacement value on the plate was made using an N-BK7 matte glass diffuser. The object moved in the direction of the OX axis, and the projections d_x and d_y were fixed. Fig. 4 shows the experimental results.

Fig. 4. Experimental determination of the d_x projection of the displacement vector d in the case of displacements close to critical, of the object as a whole along the OX axis.
а — displacement of the object $d = 5 \mu\text{m}$; б — displacement $d = 200 \mu\text{m}$

Accordingly, the projections $d_x = d$, $d_y = 0$.

It was determined that the deviation of the displacement from the mean value (dashed line) for $d = 5 \mu\text{m}$ does not exceed $0.1 \mu\text{m}$, and for $d = 300 \mu\text{m}$ it is $1.5 \mu\text{m}$.

As a result of experimental measurements, deviations in the specklogram substrates for U08M and ПФГ-03М photographic plates were revealed. Specklograms with their constant movement relative to the light beam were analyzed. With a constant movement recorded on a photographic plate, the change in the displacement value in the analyzed area of the specklogram is equal to zero, and hence the change in the phase of the signal is zero. So, the criterion for evaluating the influence of deviations of the photographic plate substrate from plane parallelism is the change in the phase of the signal during the movement of the specklograms. To obtain measurement results, it was necessary to influence the specklogram with either one light beam or two symmetrical light beams. Experimental results from measurements are presented in Fig. 5. Subject to testing were ПФГ-03М and U08М, which substrate thicknesses were 2.65 mm and 1.33 mm, respectively.

Fig. 5. Experimental results of measurements of deviations of specklogram substrates for ПФГ-03М and U08М.

а, в — illumination with one beam; б, г — symmetrical illumination with two beams

A significant result was obtained, which indicates the competitiveness of domestic holographic photographic materials based on silver halide compared to imported photographic materials. It was found that the deviations of the ПФГ-03М and U08М substrates do not differ much from each other and fully meet the requirements of production control, so the tested photographic materials can be used practically in all holographic applications.

CONCLUSION

In the work, photographs of speckle interference fields were obtained at a critical displacement value. The projections of the displacement vector are experimentally determined, and the measurement error is obtained for $d = 5 \mu\text{m}$ — $0.1 \mu\text{m}$ and $d = 200 \mu\text{m}$ — $1.5 \mu\text{m}$. Changes in the phase of the signal during the movement of specklograms on various recording media were studied by means of an experimental setup. The effect of deviations of the corresponding substrates from the plane-parallelism of the photographic

plates is estimated. Studies of the developed phase-measuring unit have shown that it can be used to decipher specklograms and meets the requirements of production control. The experimental results may be of interest for holographic practices.

REFERENCES

1. Vest Ch. *Golograficheskaya interferometriya* [Holographic interferometry]. Yu.I. Ostrovskii, ed. transl. from eng. Moscow, Mir Publ., 1982. 504 p. (In Russ.).
2. Archbold E., Ennos A.E. Displacement measurement from double-exposure laser photographs. *Optica Acta*, 1972, vol. 19, no. 4, pp. 253–271. DOI: 10.1080/713818559
3. Rastogi P.K., Jacquot P. Speckle metrology techniques: a parametric examination of the observed fringes. *Optical Engineering*, 1982, vol. 21, no. 3, id 213411. DOI: 10.1117/12.7972924
4. Franson M. *Optika spekvov* [Speckle optics]. Yu.I. Ostrovskii, ed. transl. from french. Moscow, Mir Publ., 1980. 171 p. (In Russ.).
5. Mayorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S. [Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms]. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2013, vol. 80, no. 3, pp. 47–51. URL: <http://opticjournal.ru/vipuski/770-opticheskij-zhurnal-tom-80-03-2013.html> (In Russ.).
6. Klimenko N.S. *Golografiya sfokusirovannykh izobrazhenii i spekl-interferometriya* [Holography of focused images and speckle interferometry]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 224 p. (In Russ.).
7. Tsygankova G.A., Mayorov E.E., Chernyak T.A., Konstantinova A.A., Mashek A.C., Pisareva E.A. [The study of the transverse shear interferometer for the setup of interference fringes in the processing of interferograms]. *Pribory* [Instruments], 2021, no. 2, pp. 20–25. (In Russ.).
8. Rastogi P.K., Barillot V., Kaufmann G.H. Comparative phase shifting holographic interferometry. *Applied Optics*, 1991, vol. 30, no. 7, pp. 722–728. DOI: 10.1364/AO.30.000722
9. Mayorov E.E., Arefiev A.V., Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Guliyev R.B., Tayurskaya I.S. [Experimental determination of the elementary displacement in the developed optoelectronic control system of holographic objects]. *Izvestiya TulGU* [Proceedings of the TSU], 2022, no. 12, pp. 200–205. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50128359>
10. Mayorov E.E., Kolesnichenko S.V., Konstantinova A.A., Mashek A.C., Pisareva E.A., Tsygankova G.A. [Investigation of phase fluctuations of the output signal of the phase measurement system]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2021, no. 9, pp. 1–6. DOI: 10.25791/pribor.9.2021.1287 (In Russ.).

Contacts: *Mayorov Evgeniy Evgen'evich*,
majorov_ee@mail.ru

Article received by the editorial office on 18.02.2023