

УДК 681.327.11; 535

PACS: 42.40.Eq, 42.79.Dj, 42.40.Kw

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-115-120

EDN: FAJSSW



Применение цифровой голографии для обнаружения дефектов в материалах

Ш. Б. Утамурадова, З. Т. Азаматов, В. Е. Гапонов, А. А. Жеенбеков,
Н. Н. Базарбаев, А. Б. Бахрамов

Одним из быстро развивающихся оптических методов является цифровой вариант сдвиговой корреляционной спекл-интерферометрии (голография). Основными преимуществами метода являются бесконтактный метод получения данных, малая зависимость от формы и поверхности исследуемого материала, определение градиентов перемещений точек поверхности, которые проявляются в виде аномалий в рисунке интерференционных полос, связанных с участками деформации.

Предложена и реализована схема компактного спекл-интерферометра для цифровой голографии на основе интерферометра Майкельсона. Продемонстрирована возможность выявления трещины в сварном шве на металлических (алюминиевых и стальных) пластинках.

Ключевые слова: сварной шов, дефект, голография, спекл-интерферометрия, поверхностная деформация, неразрушающий контроль, цифровая голографическая интерферометрия.

Введение

Работа посвящена актуальной проблеме создания новых и усовершенствования существующих методов и средств цифровой голографической интерферометрии для практического применения при неразрушающем контроле материалов и технической диагностике. Известно, что с изобретением и развитием голографии и голографической интерфе-

рометрии появилась реальная возможность проводить неразрушающий контроль в рамках технической диагностики, в случаях, где ранее для этих целей использовались только качественные методы оценки, либо измерение и контроль были невозможны. Цифровая голографическая интерферометрия стала логическим развитием классической голографической интерферометрии, которая позволяет решать не только задачи, которые решает классическая голографическая интерферометрия, но и значительно расширяет область ее практического применения [1–6].

Известно, что при прогибе длинных тонких изделий производная деформации связана с напряжением. Поэтому получив вторую производную смещения в точках по всей поверхности объекта, можно получить карту напряжений, которая в свою очередь может служить основой для заключения о прочностных параметрах изделия по результатам технической диагностики и неразрушающего контроля [7, 8].

Подробное математическое описание процессов записи и восстановления цифровых голограмм, фильтрации изображений и т. д. можно найти в [8–13].

Утамурадова Шарифа Бекмурадовна, директор,
д.ф.-м.н., профессор.

Азаматов Закиржан Тахирович, зав. лаб, д.ф.-м.н.,
профессор.

E-mail: zakir.azamatov@mail.ru

Гапонов Владимир Егорович, к.т.н.

Жеенбеков Акылбек Ааматович, с.н.с.

Базарбаев Нурлан Нятуллаевич, с.н.с.

Бахрамов Абдор Бурибой угли, докторант.

НИИ физики полупроводников и микроэлектроники
при Национальном университете Узбекистана.

Узбекистан, 100057, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, 20.

Статья поступила в редакцию 3.04.2023

После доработки 26.04.2023

Принята к публикации 2.05.2023

Процесс численного восстановления волновых фронтов с цифровой голограммы можно реализовать, применяя любое дискретное дифракционное преобразование: Френеля–Кирхгофа, Френеля или Фурье. Однако самым быстрым и легко реализуемым алгоритмом является быстрое преобразование Фурье, которое легче использовать в практике цифровой голографии. Поэтому схемы записи цифровых голограмм строятся так, чтобы для восстановления комплексной амплитуды изображения объекта использовать – преобразование Фурье [14–18]. Целью работы являлось создание компактного спекл-интерферометра для цифровой широкографии на основе интерферометра Майкельсона, а также отладки его применения для выявления дефектов в сварных соединений.

Экспериментальная часть

Для проведения экспериментов было собрано автономное нагрузочное устройство, на котором закрепляли исследуемый объект.

На рис. 1 представлена оптическая схема регистрации спекл-изображения объекта до и после поворота одного из зеркал на небольшой угол.

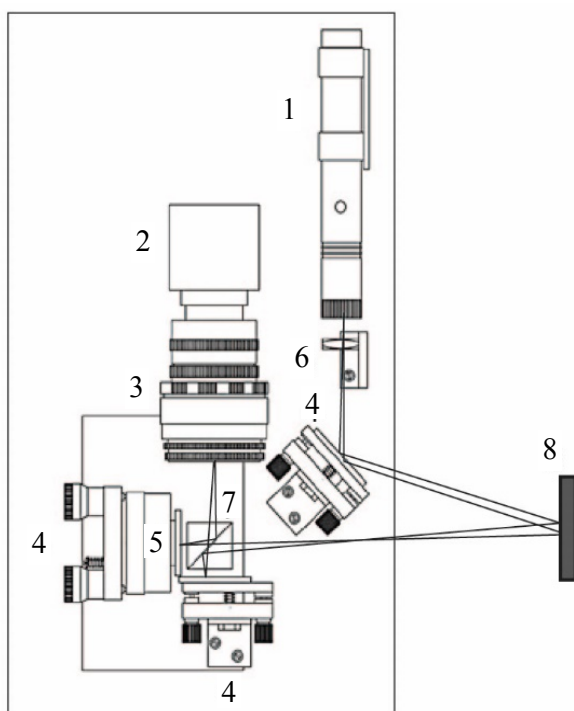


Рис. 1. Расположение основных оптических элементов широкографа

В качестве конструктивных элементов широкографа использованы широко распространенные недорогие комплектующие: 1 – лазер на кристалле ванадата иттрия, легированный неодимом, с непрерывной диодной накачкой ($YVO_4 : Nd^{3+}$) с внутррезонаторной генерацией второй гармоники на нелинейном кристалле КТР, длина волны излучения 532 нм, мощность излучения 50 мВт; 2 – CCD-камера типа ЭВС VAC 136 с компьютерным управлением; 3 – объектив Гелиос-44 с фокусным расстоянием 50 мм, жестко закрепленный вместе с CCD-камерой; 4 – зеркала со 100%-ной отражательной способностью на поворотной платформе управления лазерным лучом; 5 – пьезоактюатор КП-1; 6 – короткофокусная линза для расширения лазерного луча; 7 – призма; 8 – нагрузочное устройство с образцом.

Лазерное излучение расширяется короткофокусной линзой и направляется зеркалом 4 на исследуемый объект, закрепленный в нагрузочном устройстве. Деформирующая нагрузка на объект регулируется микрометрическим винтом. Сдвиг изображения δx задается пьезоактюатором поворотом зеркала. Контроль величины сдвига осуществляется по изображению сетки, состоящей из ячеек 10×10 мм, установленной на месте исследуемого объекта. Возможность установить требуемую величину сдвига позволяет применить фазосдвигающую методику для количественных измерений. Спекл-изображения объекта без нагрузки и при различных деформирующих нагрузках формируются объективом 3 на матрице CCD-камеры 2.

Для регистрации картины полос, цифровые значения интенсивности двух спекл-изображений, соответствующие объекту в ненагруженном и нагруженном состояниях по пиксельно вычитались. Для этого была разработана компьютерная программа. «Difference».

Эксперименты показали, что количество наблюдаемых интерференционных полос зависит от величины сдвига (или базы определения деформаций). Полосы на широкограммах являются областями равных градиентов перемещений по нормали поверхности.

Широграммы, зарегистрированные в результате экспериментов, показывают, что изображение сильно искажено мелкозернистым шумом, что усложняет восприятие и

делает практически невозможным количественную оценку относительно больших деформаций. Однако качественный анализ без применения фазового метода, например, поиск дефектов в деталях и конструкциях, возможен, если дефекты проявляются в виде неоднородностей в структуре (трещины, каверны и т. д.). Такие дефекты проявляются в виде неоднородностей в интерференционных полосах, связанных с участками с неоднородной деформацией.

Для отладки интерферометра был проведен следующий эксперимент. Алюминиевый диск толщиной 1,5 мм механически нагружали точно по центру микровинтом для создания статической деформации.

На рис. 2 представлены картины полос, полученные в результате попиксельного вы-

читания двух соответствующих спекл-интерферограмм при различных деформациях.

Для изучения возможности экспресс-анализа механических дефектов, с помощью ширографа, были проведены эксперименты по получению спекл-изображений образца со сварным швом. На рис. 3 представлены фотографии сварного шва, соединяющего две пластины из нержавеющей стали толщиной 5 мм с тыльной (а) и (б) с лицевой сторон. Из рисунка видно, что шов на тыльной стороне имеет дефект в виде разрыва и застывшей капли в месте разрыва, причем при визуальном осмотре подобный дефект с лицевой стороны не был обнаружен. Широграф устанавливался на расстоянии 60 см от исследуемого объекта. Смещение зеркала интерферометра составляло 5 мм.

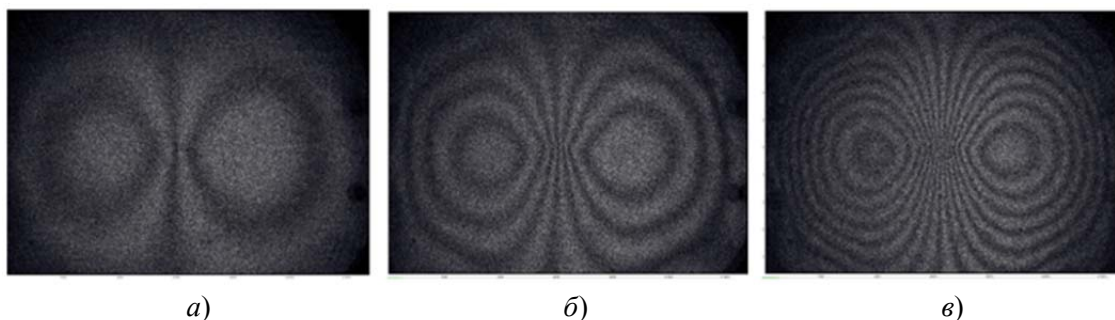


Рис. 2. Широграммы, полученные по схеме с интерферометром Майкельсона при различных значениях величин перемещения микровинта: а – 0,3 мм; б – 0,5 мм; в – 1 мм

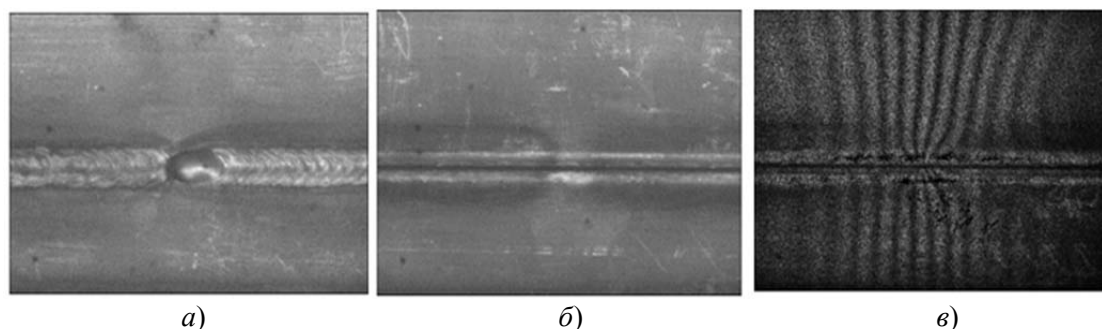


Рис. 3. Фотографии сварного шва с тыльной (а) и с лицевой (б) сторон, распределение полос на изображении лицевой стороны пластины в зоне дефекта сварного шва (в)

Для получения нагрузки и внеплоскостных деформаций пластину нагревали спиртовой горелкой в области сварного шва в течение 30–40 с. Затем с лицевой стороны последовательные регистрировали спекл-изображения объекта по мере его остывания в течение примерно 5÷15 секунд. С помощью разработанной программы «Имидж Разность»,

цифровые значения интенсивности двух соответствующих спекл-интерферограмм вычитались попиксельно, затем численно формировали кадр, в котором сигналы были пропорциональны указанной разности интенсивностей. При охлаждении образца разница между начальным нагретым состоянием и конечным увеличивается, что выражается в уве-

личении числа интерференционных полос, на которых появляются характерные искажения интерференционных полос. Из рис. 3в видно, что термические деформации, возникающие у трещины, проявляются на противоположной стороне пластины в виде сильной неоднородности поля деформаций, (искажения полос корреляции).

На рис. 4 показаны широграммы, полученные из спекл-изображений, полученных на

сварном шве, не имеющем дефектов. На этих широграммах искажения интерференционных полос не наблюдаются, что показывает отсутствие дефекта.

Это означает, что место дефекта в сварном шве можно определить по искажению рисунка полос, несмотря на то, что дефект расположен на не освещенной или на недоступной для визуального наблюдения стороне пластины.

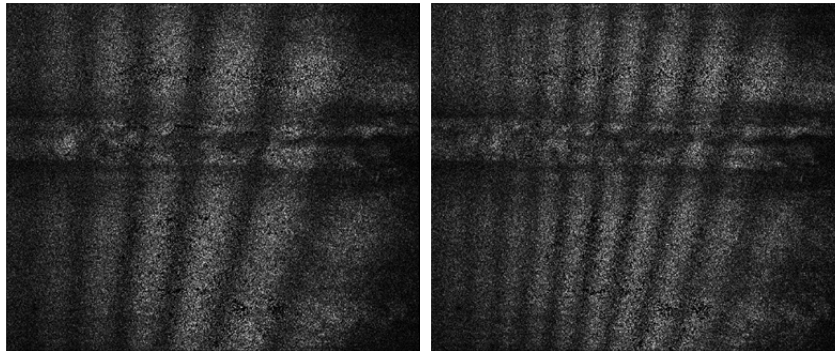


Рис. 4. Распределение полос в области сплошного шва по мере остывания образца

Заключение

Таким образом, ширография позволяет выявлять дефекты как поверхностные, так и внутренние, путем выявления аномалий в рисунке полос, при чем, контроль бесконтактный и по всему полю наблюдения. В нашем случае простой кратковременный нагрев позволил создать необходимую нагрузку для обнаружения дефекта сварного шва.

Метод ширографии, являясь оптическим методом, предоставляет широкие возможности для неразрушающего контроля дефектов конструкций и материалов, он не требует сложной оптической системы и ее настройки. Также он может быть использован в исследованиях с использованием фазосдвигающего принципа измерения, для получения количественных оценок величин деформаций и напряжений в конструкциях и деталях.

Отметим, что анализ волновых фронтов осуществляется без использования их физической реконструкции и, следовательно, может использоваться для сравнения двух и более волновых фронтов, зарегистрированных в разное время. Этот факт дает новую возможность – запись практически большой серии

одиночных цифровых голограмм, соответствующих разным состояниям объекта, а затем получение (путем попарного интерферометрического сравнения) зависимости перемещений и деформаций не только от координат, но и от времени. И, как следствие, появляется возможность на качественно новом уровне изучать деформационные, в том числе нестационарные динамические процессы (тепловое расширение, случайные и затухающие колебания, распространение упругих волн при ударах, взрывные эффекты и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Steinchen W.* Digital Shearography. Theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry. – Washington: SPIE press, 2003.
2. *Burkov M., Lyubutin P., Byakov A., Panin S.* Development of high resolution shearography device for non-destructive testing of composite materials, AIP Conf. Proc.2015. Vol. 1683. P. 020029.
3. *Long K. W.* 3-Beam phase shift shearography for simultaneous measurement of in-plane and out-of-plane displacements and its applications to residual stress easurement, Ph.D. Dissertation, Oakland University, 1996.
4. *Hung Y. Y., Wang J. Q.* / Opt. Lasers Eng. 1996. Vol. 24 (5–6). P. 403–413.
5. *Hung Y. Y., Long K. W., Wang J. W.* / Opt. Lasers Eng. 1997. Vol. 27 (1). P. 61–73.

6. *Chen F., Griffen C. T., Hung Y. Y.* Stroboscopic phase shifting shearography for automated vibration measurement, in: Proceedings of the 15th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise 1995 ASME Design Engineering Technical Conferences. Vol. 3, part C, Boston, Massachusetts, September 17–20, 1995. P. 1399–1415.
7. *Hung Y. Y., Shi Dahuan.* / Opt. Eng. 1998. Vol. 37 (5). P. 1406–1409.
8. Отчет о НИР «Научные основы диагностики предразрушения и оценки ресурса работы многоуровневых структурно-неоднородных сред», ИФПМ СО РАН, Томск, 2017.
9. *Hung Y. Y.* / J. Nondestructive Eval. 1989. Vol. 8 (2). P. 55–68.
10. *Hung Y. Y.* Automated shearography for nondestructive testing and strain measurement, in: Proceedings of the SPIE Conference on Nondestructive Evaluation of Aircraft, Airports, Aerospace Hardware and Materials. Vol. 2455, Oakland, California, June 6–8, 1995. P. 238–249.
11. *Hung Y. Y.* Computerized shearography and its application for nondestructive evaluation of composites, in: C. H. Jenkins (Ed.), Manual on Experimental Methods of Mechanical Testing of Composites, Society for Experimental Mechanics, 1998 (Chapter 17).
12. *Азаматов З. Т., Рахматуллаев И. А., Маматкулов Ш. И., Керимов Ф. А.* «КМОП и ПЗС матрицы в физических измерениях» Материалы конференции «II международная конференция «Оптика и фотоника–2013», Самарканд, 2013.
13. *Aguayo D., Santoyo F., De la Torre M. H., Salas-Araiza M. D., Caloca-Mendez C., Gutierrez Hernandez D.* / Optics Express. 2010. V. 18. № 6. P. 5661–5667.
14. *Rao K., Kim D. N., Hwang J. J.* Fast Fourier Transform: Algorithms and Applications. – Springer, 2008.
15. *Krasnoperov E. A.* / Journal of Optical Technology. 2006. Vol. 73. № 2. P. 96–100.
16. *Диков О. В., Савонин С. А., Качула В. И., Рябухо В. П.* / Компьютерная оптика. 2012. Т. 36. № 1. С. 51–64.
17. *Гуревич В. С., Гапонов В. Е., Исаев А. М., Редкоречев В. И.* Цифровая голографическая интерферометрия как метод анализа деформаций и неразрушающих испытаний Труды Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Аэродинамика и прочность конструкций летательных аппаратов, Новосибирск, 2011.
18. *Гапонов В. Е., Гуревич В. С., Гусев М. Е., Исаев А. М.* Прикладная программа для ЭВМ «IESPIM-2.2» Свидетельство о гос. регистрации № 2010610737, 2010 г.

PACS: 42.40.Eq, 42.79.Dj, 42.40.Kw

Application of speckle interferometry for non-destructive testing of objects

*Sh. B. Utamuradova, Z. T. Azamatov, V. E. Gaponov, A. A. Jeenbekov,
N. N. Bazarbaev and A. B. Bakhromov*

Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics
at the National University of Uzbekistan
20 Yangi Almazar st., Tashkent, 100057, Uzbekistan
E-mail: zakir.azamatov@mail.ru

Received 3.04.2023; revised 26.04.2023; accepted 2.05.2023

One of the rapidly developing optical methods is the method of correlation speckle interferometry or the so-called shear speckle interferometry (shearography). The main advantages of the method are higher accuracy of strain estimation, non-contact method of data acquisition, low dependence on the shape and surface of the material under study, as well as ease of setup and operation. This provides direct measurements of strain gradients in real time.

A scheme of a compact speckle interferometer for digital shearography based on the Michelson interferometer is proposed and implemented. The possibility of detecting a crack in a welded joint of metal (aluminum and steel) plates is demonstrated.

Keywords: shearography, speckle interferometry, surface deformation, non-destructive testing, digital holographic interferometry.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-115-120

REFERENCES

1. Steinchen W., Digital Shearography. Theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry, Washington: SPIE press, 2003.
2. Burkov M., Lyubutin P., Byakov A. and Panin S., Development of high resolution shearography device for non-destructive testing of composite materials, AIP Conf. Proc. **1683**, 020029 (2015).
3. Long K. W., 3-Beam phase shift shearography for simultaneous measurement of in-plane and out-of-plane displacements and its applications to residual stress measurements, Ph.D. Dissertation, Oakland University, 1996.
4. Hung Y. Y. and Wang J. Q., Opt. LasersEng. **24** (5–6), 403–413 (1996).
5. Hung Y. Y., Long K. W. and Wang J. W., Opt. LasersEng. **27** (1), 61–73 (1997).
6. Chen F., Griffen C. T. and Hung Y. Y., Stroboscopic phase shifting shearography for automated vibration measurement, in: Proceedings of the 15th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise 1995 ASME Design Engineering Technical Conferences, vol. 3, part C, Boston, Massachusetts, September 17–20, 1995, pp. 1399–1415.
7. Hung Y. Y. and Shi Dahuan, Opt. Eng. **37** (5), 1406–1409 (1998).
8. Research report “Scientific foundations for diagnosing pre-fracture and evaluating the service life of multilevel structurally inhomogeneous media”, ISPMS SB RAS, Tomsk 2017.
9. Hung Y. Y., J. Nondestructive Eval. **8** (2), 55–68 (1989).
10. Hung Y. Y., Proc. of the SPIE Conference on Nondestructive Evaluation of Aircraft, Airports, Aerospace Hardware and Materials, vol. 2455, Oakland, California, June 6–8, 1995, pp. 238–249.
11. Hung Y. Y., Computerized shearography and its application for nondestructive evaluation of composites, in: C.H. Jenkins (Ed.), Manual on Experimental Methods of Mechanical Testing of Composites, Society for Experimental Mechanics, 1998 (Chapter 17).
12. Azamatov Z. T., Rakhmatullaev I. A., Mamatkulov Sh. I. and Kerimov F. A., "CMOS and CCD matrices in physical measurements" Proceedings of the conference "II International Conference "Optics and Photonics–2013", Samarkand, 2013.
13. Aguayo D., Santoyo F., De la Tone M. H., Salas-Araiza M. D., Caloca-Mendez C. and Gutierrez Hernandez D., Optics Express **18** (6), 5661–5667 (2010).
14. Rao K., Kim D. N. and Hwang J. J., Fast Fourier Transform: Algorithms and Applications, Springer, 2008.
15. Krasnopevtsev E. A., Journal of Optical Technology **73** (2), 96–100 (2006).
16. Dikov O. V., Savonin S. A., Kachula V. I. and Ryabukho V. P., Computer Optics **36** (1), 51–64 (2012).
17. Gurevich V. S., Gaponov V. E., Isaev A. M. and Redkorechev V. I., Digital holographic interferometry as a method of deformation analysis and non-destructive testing, Proceedings of the All-Russian Anniversary Scientific and Technical Conference “Aerodynamics and strength of aircraft structures”, Novosibirsk, 2011.
18. Gaponov V. E., Gurevich V. S., Gusev M. E. and Isaev A. M., registration № 2010610737, 2010.