# ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

# И.П. Мирошниченко

Описаны результаты разработки и расчетно-экспериментального обоснования средств бесконтактного измерения малых перемещений поверхностей объектов контроля в интересах создания перспективных высокоточных оптических измерительных средств и технологий для диагностики состояния материалов и изделий на всех этапах их жизненного цикла, предложены основные направления для их дальнейшего совершенствования.

Ключевые слова: лазерный интерферометр, интерференционная картина, измерение малых перемещений, поверхность объекта контроля, диагностика состояния.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из актуальных направлений для решения научных и производственных задач диагностики состояния конструкционных материалов и изделий на различных этапах их жизненного цикла и экспериментальных исследований процессов дефектообразования в новых материалах является разработка и использование новых измерительных технологий и новых высокоточных бесконтактных измерительных средств для регистрации малых перемещений поверхностей объектов контроля, основанных на применении методов лазерной интерферометрии. Это позволяет существенно повысить качество и информативность анализа упругих волновых полей при ультразвуковой дефектоскопии, диагностике состояния материалов и изделий акустико-эмиссионными методами, т.е. повысить качество и надежность машин и оборудования различного назначения.

Целями работы являлись разработка и научное (расчетно-экспериментальное) обоснование перспективных методов, способов и средств бесконтактного измерения малых перемещений поверхностей объектов контроля в интересах создания новых высокоточных оптических измерительных средств и технологий для диагностики состояния конструкционных материалов и изделий на всех этапах их жизненного цикла (в процессе производства и при эксплуатации) активными и пассивными акустическими методами неразрушающего контроля на основе современных методов лазерной интерферометрии.

За основу для решения поставленных задач был выбран двухходовой лазерный интерферометр с совмещенными ветвями, типовая схема которого представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Типовая схема двухходового лазерного интерферометра с совмещенными ветвями

Данный интерферометр содержит оптически связанные и последовательно размещенные источник 1 когерентного оптического излучения, оптическую систему 2, светоделитель 3, отражатель 4, закрепленный на поверхности 5 объекта контроля 6 и экран 7 с установленными на нем фотоприемными устройствами 10. При этом светоделитель 3 и отражатель 4 расположены друг относительно друга под углом  $\alpha$ , полученная при совмещении опорного 11 и объектного 12 пучков интерференционная картина 8, представляющая собой совокупность колец 9 различной интенсивности, проецируется на экран 7, а фотоприемные устройства 10 установлены

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

## ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

в кольцах 9 интерференционной картины 8.

Модификация описанного двухходового лазерного интерферометра с совмещенными ветвями проводилась путем расширения его функциональных возможностей и обеспечения возможности использования для решения практических задач в составе мобильных диагностических комплексов.

# ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

По итогам проведенных работ разработаны и предложены:

1. Новые математические модели и программное обеспечение для моделирования полей интенсивности оптического излучения в интерференционных картинах, создаваемых оптическим измерителем перемещений на основе двухходового лазерного интерферометра с совмещенными ветвями с учетом особенностей оптической измерительной схемы и вида светоделителя и техническое решение (измерительное устройство) [1], обеспечивающее его реализацию при решении актуальных научных и производственных задач.

Перечисленные результаты позволяют численно моделировать различные. определяемые целями конкретной измерительной задачи, оптические схемы интерференционных измерителей для бесконтактного измерения малых перемещений поверхностей объектов контроля на основе рассматриваемого интерферометра, а также повысить точность результатов измерений малых перемещений поверхностей объектов контроля в процессе диагностики состояния конструкционных материалов акустическими неразрушающими методами контроля до 30 % в зависимости от используемого метода обработки информации с интерференционной картины путем учета неоднородностей распределения интенсивности оптического поля интерференционной картины.

С использованием предложенных моделей и программного обеспечения проведено численное моделирование распределений интенсивности оптических полей интерференционных картин при регистрации малых перемещений поверхностей объектов контроля для различных вариантов оптических измерительных схем и видов светоделителей, результаты которых, например, приведены на рисунках 2, 3. В качестве светоделителей были рассмотрены полупрозрачное зеркало, амплитудная синусоидальная решетка, амплитудная зонная пластинка, фазовая синусоидальная решетка, фазовая зонная пластинка и амплитудная голографическая дифракционная решетка.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований и опытной эксплуатации.



Рисунок 2 – Распределение интенсивности в горизонтальном сечении интерференционной картины (светоделитель – амплитудная синусоидальная решетка)



Рисунок 3 – Распределение интенсивности в горизонтальном сечении интерференционной картины (светоделитель – фазовая синусоидальная решетка)

На рисунке 4 в качестве примера представлены результаты численного моделирования зависимостей изменения интенсивности оптического поля интерференционной картины в горизонтальном сечении для перемещений h=0 (кривая 1) и  $h=\lambda/4$  (кривая 2) (где  $\lambda$  – длина волны оптического излучения используемого лазера) для светоделителя в виде дифракционной решетки, снятой во встречных пучках (а), и для светоделителя в виде полупрозрачного зеркала (б), а на рисунке 5 – схема измерителя малых перемещений с выделенной областью 11 для регистрации интенсивности оптического поля интерференционной картины.

2. Новый метод измерения малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля, его научное обоснование и способ измерений [2].

Сущность предлагаемого способа заключается в том, что в качестве светоделителя используют синусоидальную дифракционную решетку, на экран проецируют максимумы +1 и -1 порядков интерференционной картины, фотоприемники разделяют на две группы и размещают в областях максимумов +1 и -1 порядков интерференционной картины, а значения составляющих малого перемещения определяют на основании двух значений интенсивности, измеренных группами фотоприемников по известным для каждого максимума зависимостям, связывающим ее с линейным и угловым перемещением, при этом в качестве результата принимают значение линейной и угловой составляющих перемещения, одновременно удовлетворяющее значениям измеренной интенсивности в максимумах +1 и -1 порядков.



Рисунок 4 – Распределение интенсивности в горизонтальном сечении интерференционной картины (фазовая зонная пластинка)

Существенным отличием предлагаемого способа, по сравнению с известными, является обеспечение возможности одновременной регистрации малых линейных и угловых перемещений поверхности объекта контроля при помощи одного оптического измерителя.

На рисунке 6 приведена оптическая схема предлагаемого способа.



3. Новые метод комплексной коррекции результатов измерения перемещений оптическими интерференционными средствами, его научное обоснование и способ измерений [3].

Предлагаемые результаты отличаются от известных тем, что в процессе измерения перемещений поверхности объекта контроля одновременно и непрерывно производится регистрация суммарной интенсивности оптического поля по площади интерференционной картины, по величине которой определяют поправку в результаты измерений. Это позволяет провести коррекцию результатов

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

# ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

измерений непосредственно в процессе контроля и повысить точность результатов измерений до 20 %.

На рисунке 7 представлены полученные экспериментально зависимость изменения суммарной интенсивности оптического поля интерференционной картины в процессе измерения перемещения поверхности объекта контроля (а) и результаты прямого измерения перемещения поверхности объекта контроля (б), при этом пунктирная линия – результат измерений, а сплошная линия – результат измерений после внесения поправки.





Рисунок 7 – Результаты измерений

4. Новый метод повышения виброустойчивости измерителя малых перемещений на основе использования его собственных измерительных возможностей, его научное обоснование и измерительное устройство [4], обеспечивающее его реализацию.

Предлагаемые результаты отличаются от известных непрерывными в процессе проведения измерений перемещений поверхности объекта контроля регистрацией и компенсацией влияния внешнего дестабилизирующего воздействия (вибраций, ударов и т.п.) на результаты измерений, позволяют повысить точность результатов измерений до 40 % в зависимости от вида внешнего воздействия.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

5. Новое измерительное устройство [5], реализующее оптические интерференционные методы измерения перемещений, адаптированное для использования в составе стационарных и мобильных диагностических комплексов и позволяющее обеспечить решение измерительных задач как в лабораторных условиях (стационарные комплексы), так и в «полевых» условиях (мобильные комплексы) при полном сохранении функциональных возможностей методов, снижении трудоемкости и затрат времени на установку и регулировку при подготовке к измерениям, а также в процессе проведения измерений.

На рисунке 8 представлена схема устройства для измерения малых перемещений для мобильных диагностических комплексов.



Рисунок 8 – Схема устройства для мобильных диагностических комплексов

#### выводы

Описанные результаты опубликованы в коллективных монографиях и научных статьях [6–18], докладывались, обсуждались и получили одобрение специалистов на Международных НТК и НПК.

Предложенные решения защищены патентами РФ на изобретения [1–5], экспонировались на Международном салоне изобретений «Concours Lepine International Paris 2014», Международном салоне изобретений «Inventions Geneva-2014», Международных салонах исследований, изобретений и трансфера технологий «INVENTICA 2013-2015», Международном фестивале инноваций, знаний и творчества «Tesla Fest - 2014», Московских международных салонах изобретений и инновационных технологий «Архимед-2013-2016», где были отмечены 13 медалями.

Описанные решения изготовлены в виде полномасштабных измерительных средств и использованы при решении актуальных научных и производственных задач [19].

Анализ полученных результатов позволил сформулировать и предложить следующие основные направления для дальнейшего совершенствования средств измерений:

 для повышения качества результатов наиболее целесообразным является разработка новых комбинированных способов и устройств компенсации влияния внутренних и внешних дестабилизирующих воздействий;

 для расширения функциональных возможностей наиболее целесообразным является разработка способов и устройств, обеспечивающих одновременную регистрацию как линейной, так и всех угловых составляющих малых перемещений без применения дополнительных средств измерений;

для расширения объемов использования в составе как стационарных, так и мобильных диагностических комплексов, наиболее целесообразным является разработка и использование новых способов и устройств для автоматизированной подготовки средств к проведению измерений.

Настоящие разработки частично поддержаны грантом РФФИ № 16-08-00740.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2373492 РФ. Оптическое устройство для измерения перемещений / Мирошниченко И. П., Паринов И. А., Рожков Е. В., Серкин А. Г., 2009.

2. Патент 2388994 РФ. Способ измерения линейных и угловых перемещений / Мирошниченко И. П., Серкин А. Г., Сизов В. П., 2010.

3. Патент 2343403 РФ. Способ регистрации перемещений оптическими датчиками / Алехин В. Е., Мирошниченко И. П., Серкин А. Г., Сизов В. П., 2009.

4. Патент 2410642 РФ. Интерференционный измеритель малых перемещений / Мирошниченко И. П., Нестеров В. А., Серкин А. Г., Сизов В. П., Шевцов В. А., 2011.

5. Патент 2407988 РФ. Оптическое устройство для измерения перемещений / Мирошниченко И. П., Паринов И. А., Рожков Е. В., Серкин А. Г., 2010.

6. Мирошниченко, И. П. Численное исследо-

вание метода измерений малых линейных и угловых перемещений лазерными интерферометрами / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин, В. П. Сизов // Измерительная техника. – 2007. – № 1. – С. 9–13.

7. Мирошниченко, И. П. Особенности использования интерференционных измерителей малых перемещений при решении задач диагностики технического состояния конструкций / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Дефектоскопия. – 2007. – № 4. – С. 31–38.

8. Мирошниченко, И. П. Унифицированный метод измерения малых пространственных перемещений лазерными интерферометрами / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин, В. П. Сизов // Известия вузов. Приборостроение. – 2007. – № 12. – С. 34–40.

9. Мирошниченко, И. П. Коррекция результатов измерений малых перемещений лазерными интерферометрами / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Датчики и системы. – 2008. – № 3. – С. 28–30.

10. Мирошниченко, И. П. Унифицированный метод измерения малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Дефектоскопия. – 2008. – № 5. – С. 23–27.

11. Мирошниченко, И. П. Использование точечного источника излучения для расширения функциональных возможностей измерителя перемещений / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин, В. П. Сизов // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75, № 7. – С. 41–47.

12. Мирошниченко, И. П. Перспективные оптические средства измерения малых перемещений для систем диагностики технического состояния материалов и изделий / И. П. Мирошниченко // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 1. – С. 45–49.

13. Мирошниченко, И. П. Об использовании оптических интерференционных методов для измерения линейных и угловых перемещений в системах диагностики технического состояния материалов и изделий / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 7. – С. 46–50.

14. Miroshnichenko, I. P. Novel Test Means and Techniques Based on Optical Interferometry and Acoustic Emission to Study Displacements of Object Surfaces and Damage of High-Temperature Superconductive Tapes and Related Composites / I. P. Miroshnichenko, I. A. Parinov, E. V. Rozhkov, A. G. Serkin, V. P. Sizov // Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. – New York : Nova Science Publishers, 2012. – P. 238–282.

15. Miroshnichenko, I. P. Novel Optical Means for Measurement of Displacements of Surfaces of the Control Objects at Diagnostics of Materials and Goods / I. P. Miroshnichenko, I. A. Parinov, E. V. Rozhkov, V. P. Sizov, V. A. Shevtsov // Physics and Mechanics of New Materials and their Applications. – New York : Nova Science Publishers, 2013. – P. 145–154.

16. Мирошниченко, И. П. Оптическое интерференционное устройство для измерений малых перемещений поверхностей объектов контроля с защитой от внешних механических воздействий / И. П. Мирошниченко, В. А. Шевцов // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 66–71.

17. Мирошниченко, И. П. Высокоточные оптические средства измерения перемещений для мо-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

## ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

бильных диагностических комплексов / И. П. Мирошниченко // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 95–99.

18. Miroshnichenko, I. P. Mathematical Models, Program Software, Technical and Technological Solutions for Measurement of Displacements of the Control Object Surfaces by Laser Interferometer / I. P. Miroshnichenko, I. A. Parinov, E. V. Rozhkov, S.-H. Chang // Advanced Materials Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications, Springer Proceedings in Physics, Volume 175, Chapter 24. – Springer International Publishing, Switzerland, 2016. – P. 341–356.

19. Мирошниченко, И. П. Экспериментально-

измерительная установка для исследования процессов дефектообразования в тонких образцах перспективных конструкционных материалов // Современные научные исследования. Выпуск 3. – Концепт. – 2015. – ART 85842. – URL: http://ekoncept.ru/2015/85842.htm - ISSN 2304-120X.

**Мирошниченко И.П.**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Основы конструирования машин» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», e-mail: ipmir@rambler.ru.