

*Материалы
для участия в конкурсе на соискание премии
«АВИАСТРОИТЕЛЬ ГОДА»*

*Мирошниченко И.П.
«ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
И СРЕДСТВА ДЛЯ ИХ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ.
РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ»*

Краткое описание

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

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

Разработаны и предложены:

1. Новые математические модели, научно-методический аппарат и программное обеспечение для определения напряженно-деформированного состояния в слоистых цилиндрических и эллиптических конструкциях с анизотропными слоями при многократном импульсном зондирующем воздействии по их внешней и внутренней поверхностям на основе обобщенного метода скаляризации динамических упругих полей перемещений, напряжений и деформаций в трансверсально-изотропных средах с учетом особенностей всех типов волн, распространяющихся в трансверсально-изотропных композиционных материалах, волновых процессов в слоистых конструкциях и влияния кривизны поверхности рассматриваемых конструкций (цилиндрические и эллиптические).

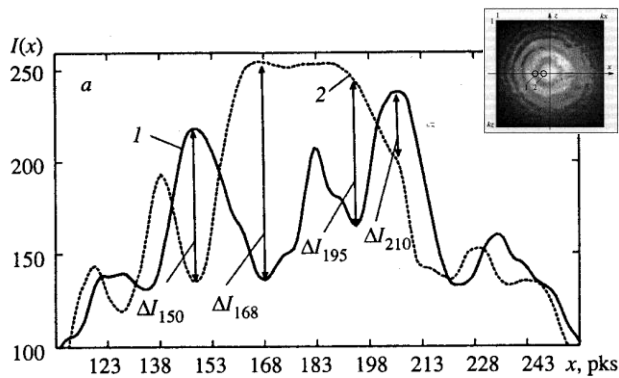
ские) при заданном пространственно-временном распределении источников локального импульсного зондирующего воздействия [1, 33-38, 40, 43].

Перечисленные результаты **позволяют** численно определить динамические упругие поля перемещений, напряжений и деформаций в слоистых цилиндрических и эллиптических конструкциях (силовые корпусные конструкции, фюзеляж, крыло, лопасть и др.) с анизотропными слоями при многократном импульсном зондирующем воздействии с заданным пространственно-временным распределением его источников на внешней и внутренней поверхностях рассматриваемых конструкций как в процессе воздействия, так и по его завершении, с учетом отмеченных особенностей волновых процессов. Применительно к задачам диагностики состояния конструкционных материалов перечисленные результаты **позволяют** существенно сократить время обработки результатов неразрушающего контроля акустическими методами и повысить их информативность за счет априорного анализа рассчитанных зависимостей изменения перемещений на внешней и внутренней поверхностях объектов контроля, а также при сравнительном анализе с результатами измерений.

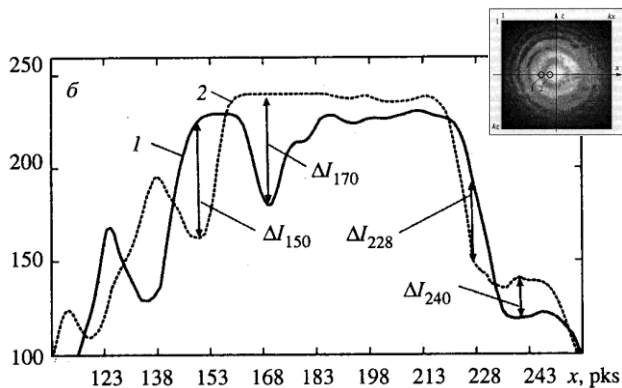
2. Новые математическая модель и программное обеспечение для моделирования полей интенсивности оптического излучения в интерференционных картинах, создаваемых оптическим измерителем перемещений на основе двухходового лазерного интерферометра с совмещенными ветвями с учетом особенностей оптической измерительной схемы и вида светоделителя и техническое решение (измерительное устройство), обеспечивающее его реализацию при решении научных и производственных задач [3, 9, 11-12, 18, 21, 23, 30, 39, 44, 46, 50].

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 двухходового лазерного интерферометра с совмещенными ветвями, 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.

На рис. 1 для 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 λ - 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 рис. 2 - схема описанного измерителя малых перемещений с выделенной областью 11 для регистрации интенсивности оптического поля интерференционной картины и внешний вид опытного образца.



а.



б.

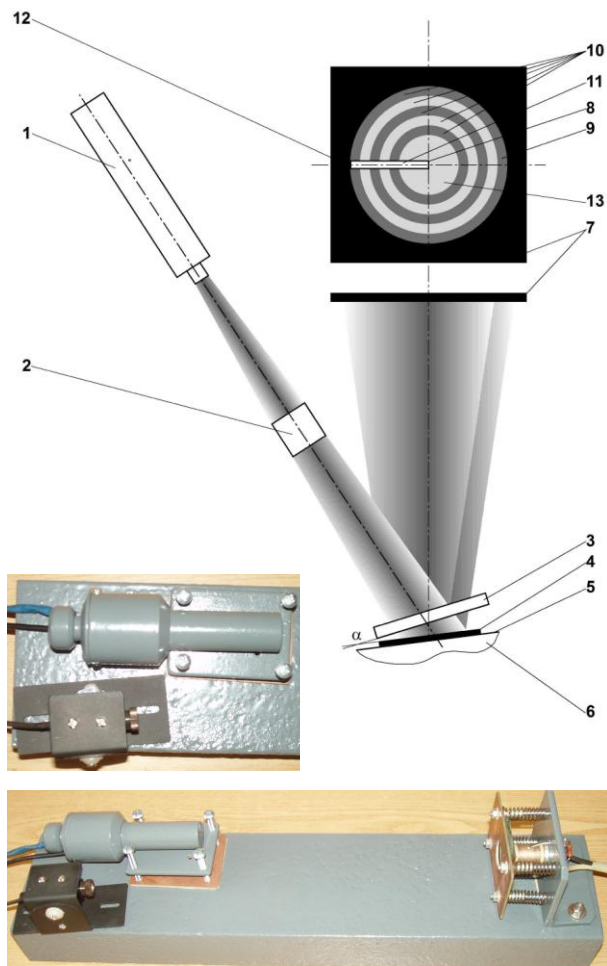


Рис. 2

Рис. 1

3. Новый метод бесконтактного измерения малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля, его научное расчетно-экспериментальное обоснование (математическая модель, программное обеспечение, результаты численного моделирования, экспериментальные средства, результаты экспериментальных исследований и т.п.) и технологическое решение (способ измерений), обеспечивающее его реализацию при решении научных и производственных задач [3-4, 11, 13, 16, 18-19, 21, 25, 28, 39, 44, 46, 50].

Сущность предлагаемых решений заключается в том, что в качестве светоделиителя 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.

Существенным *отличием* предлагаемого технологического решения по сравнению с известными аналогами является обеспечение возможности одновременной бесконтактной регистрации малых линейных и угловых перемещений поверхности объекта контроля при помощи одного оптического измерителя, что *позволяет* расширить его функциональные возможности.

На рис. 3 приведена оптическая схема предлагаемого технологического решения, на рис. 4 внешний вид интерференционной картины с областями размещения фотоприемников в -1 и +1 максимумах интерференционной картины, на рис. 5 - зависимости интенсивности от линейного и углового перемещения поверхности объекта контроля в -1 (а.) и +1 (б.) максимумах интерференционной картины (сплошные линии - результаты численного моделирования, а пунктирные - результаты эксперимента).

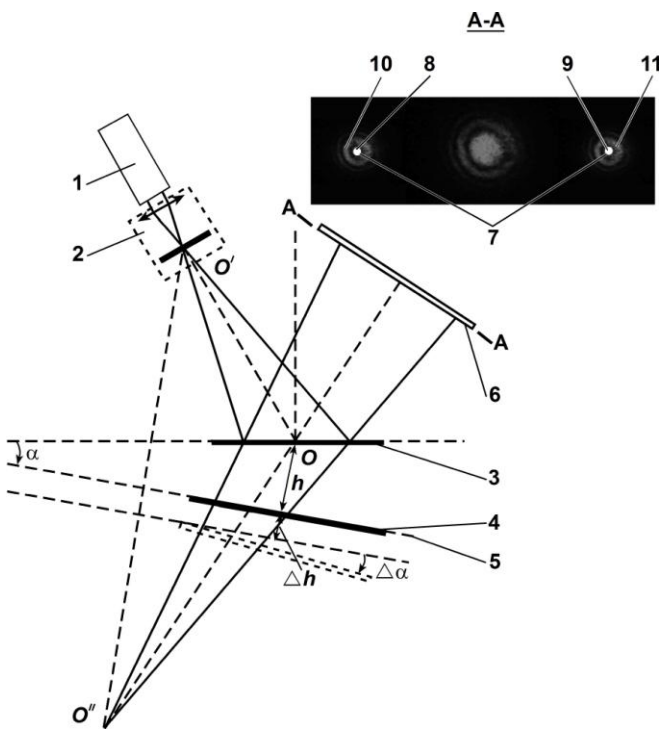


Рис. 3

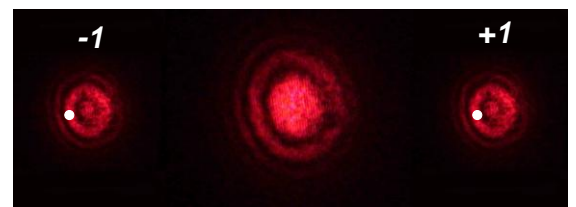
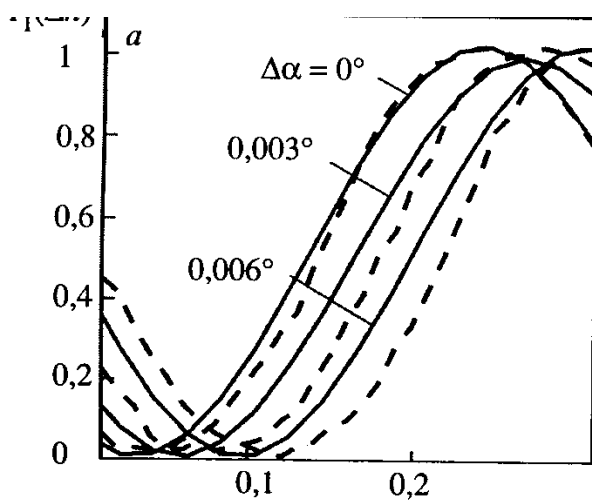
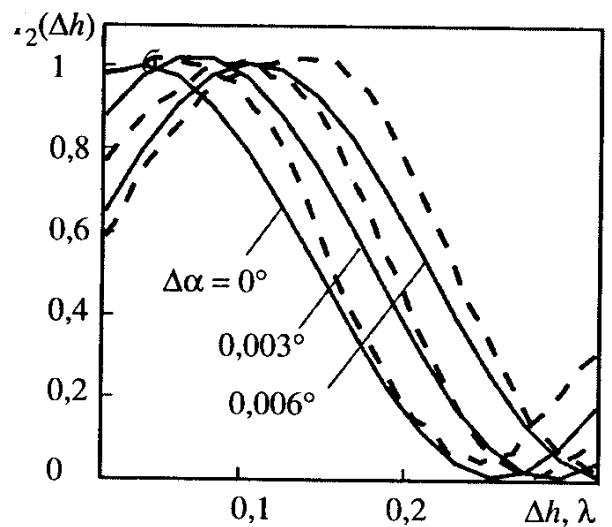


Рис. 4



а.



б.

Рис. 5

4. Новый метод бесконтактного измерения перемещений поверхностей объектов контроля (метод подсвечивания поверхностей объектов контроля лазерным интерферометром), его научное расчетно-экспериментальное обоснование (математическая модель, программное обеспечение, результаты численного моделирования, экспериментальные средства, результаты экспериментальных исследований и т.п.) и техническое решение (измерительное устройство), обеспечивающее его реализацию при решении научных и производственных задач [3, 7-8, 15-17, 22, 24, 32, 42, 44-46, 50].

Сущность предлагаемых результатов заключается в том, что объект контроля размещен после оптической системы, которая фокусирует оптическое излучение на его поверхность в виде светящейся точки, светоделитель, отражатель и фотоприемное устройство жестко закреплены на общем основании, снабженном механизмом перемещения, выполненным с возможностью увеличения расстояния между поверхностью объекта контроля и внешней поверхностью светоделителя при увеличении диапазона измеряемых перемещений и уменьшения расстояния между поверхностью объекта контроля и внешней поверхностью светоделителя при уменьшении диапазона измеряемых перемещений.

Существенным **отличием** предлагаемого решения от известных аналогов является возможность изменения диапазона измеряемых значений перемещений поверхности объекта контроля в процессе эксперимента без изменений измерительной схемы путем изменения кривизны волнового фронта оптического излучения, отраженного от поверхности объекта контроля, что **позволяет** расширить функциональные возможности оптического интерференционного измерителя перемещений.

На рис. 6 представлена схема предлагаемого измерительного устройства, на рис. 7 - внешний вид опытного образца, а на рис. 8 - полученная экспериментально зависимость изменения чувствительности от расстояния между поверхностями объекта контроля и светоделителя.

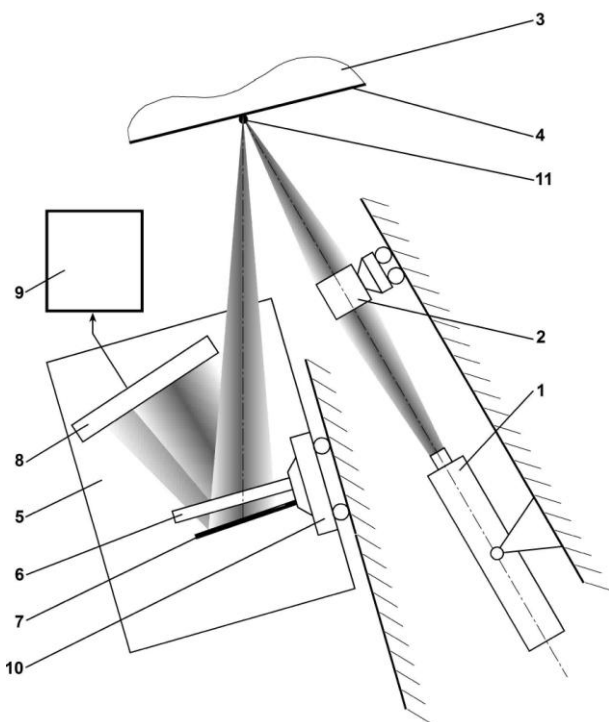


Рис. 6

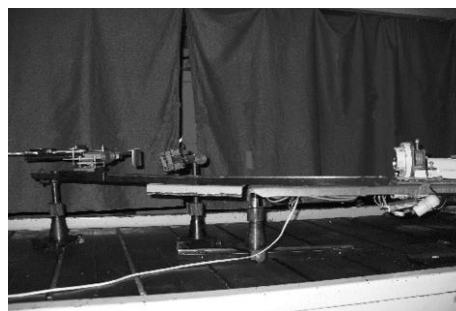


Рис. 7

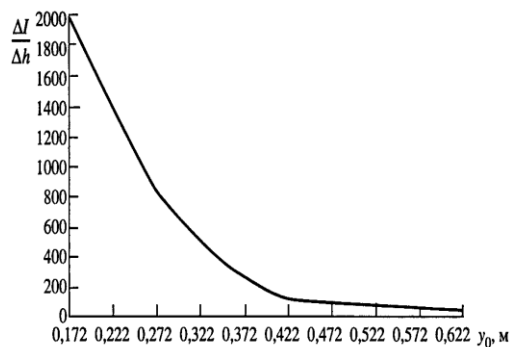


Рис. 8

5. Новый метод комплексной коррекции результатов измерения перемещений оптическими интерференционными средствами, его научное расчетно-экспериментальное обоснование (математическая модель, программное обеспечение, результаты численного моделирования, экспериментальные средства, результаты экспериментальных исследований и т.п.) и технологическое решение (способ измерений), обеспечивающее его реализацию при решении научных и производственных задач [3, 5, 9-10, 14, 16, 20, 31, 32, 44, 46, 50].

Предлагаемые результаты *отличаются* от известных аналогов 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 измерений непосредственно в процессе контроля («в едином масштабе времени») и повысить точность результатов измерений до 20% в зависимости от амплитуды возмущения.

На рис. 9 представлена схема устройства, реализующего предлагаемое технологическое решение, на рис. 10 - 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.

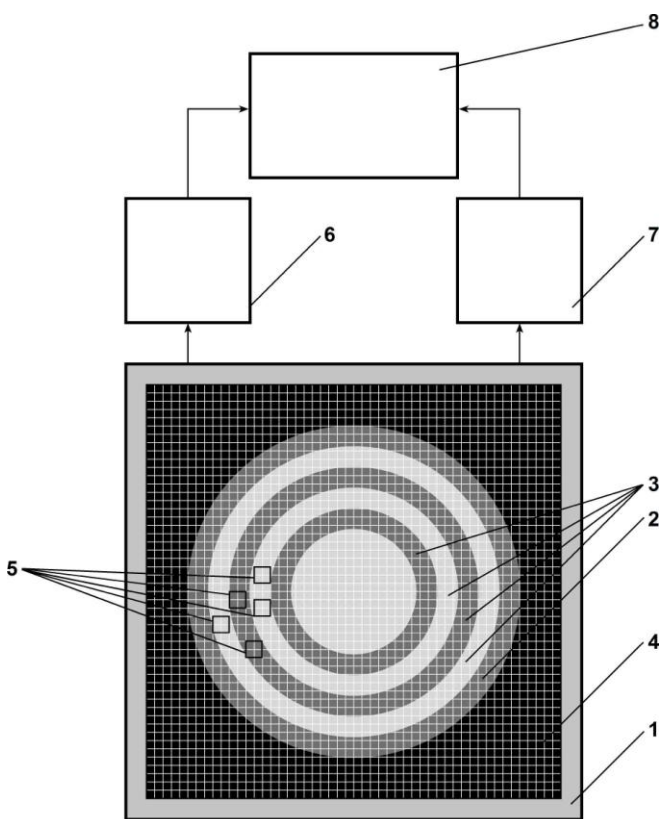
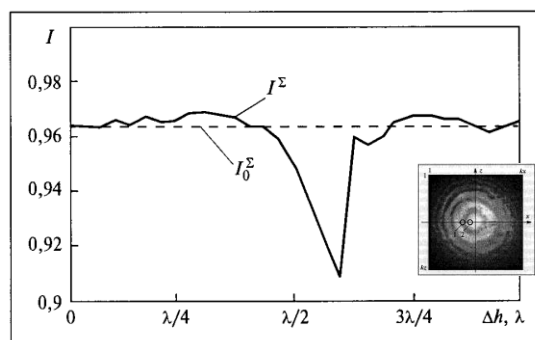
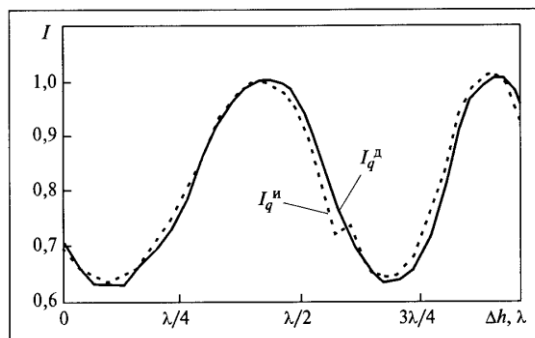


Рис. 9



а.



б.

Рис. 10

6. Новый метод повышения виброустойчивости оптического интерференционного измерителя перемещений на основе использования его собственных измерительных возможностей, его научное расчетно-экспериментальное обоснование (экспериментальные средства, результаты экспериментальных исследований и т.п.) и техническое решение (измерительное устройство), обеспечивающее его реализацию при решении научных и производственных задач [2-3, 26, 41, 44, 47, 49-50].

Предлагаемые результаты *отличаются* от известных аналогов 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 дестабилизирующего воздействия.

На рис. 11 представлена схема предлагаемого технического решения, а на рис. 12 - внешний вид опытного образца и его составных частей.

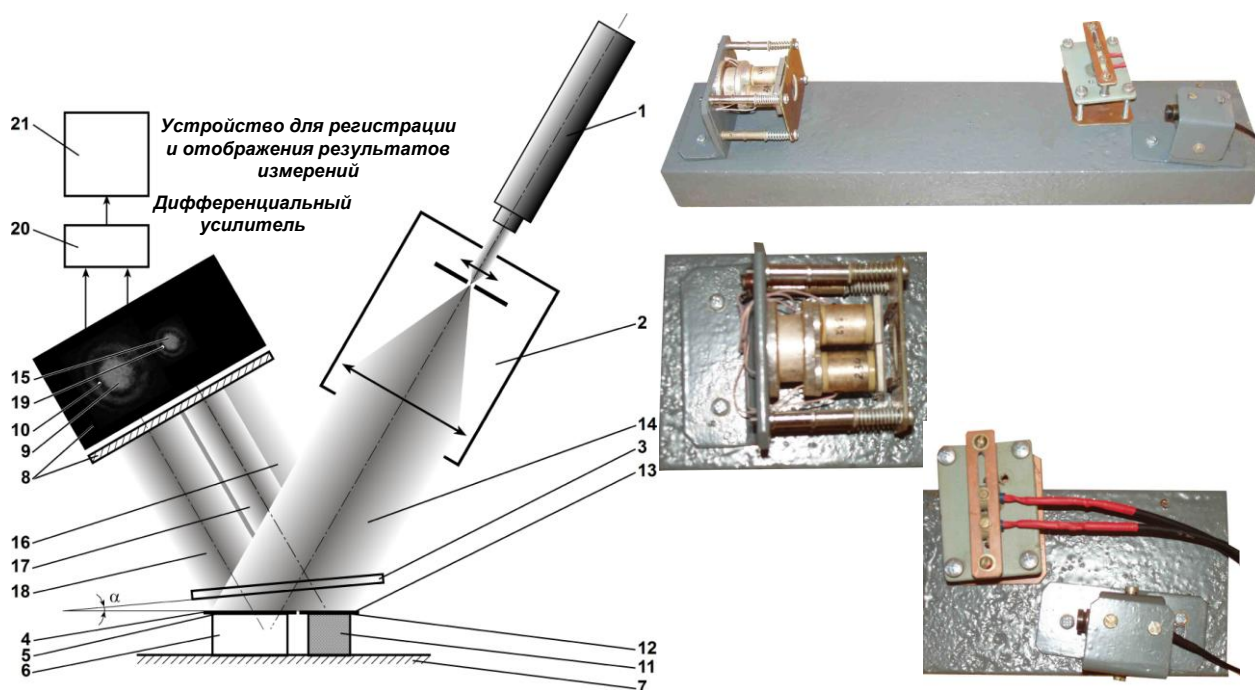


Рис. 11

Рис. 12

7. Новые научно-обоснованные технические решения (измерительные устройства), реализующие оптические интерференционные методы измерения перемещений поверхностей объектов контроля (по п.п. 2-6), адаптированные для использования в составе стационарных и мобильных диагностических станций [2-3, 6, 27, 29, 41, 44, 46, 48, 50].

Данные технические решения *позволяют* обеспечить решение измерительных задач как в лабораторных условиях (стационарные диагностические станции), так и в «полевых» условиях (мобильные диагностические станции) при полном сохранении функциональных возможностей методов по п.п. 2-6, снижении трудоемкости и затрат времени на установку и регулировку при подготовке к измерениям, а также в процессе проведения измерений.

На рис. 13 представлена схема устройства для измерения малых перемещений поверхностей объектов контроля для мобильных диагностических станций, а на рис. 14 - внешний вид опытного образца данного устройства.

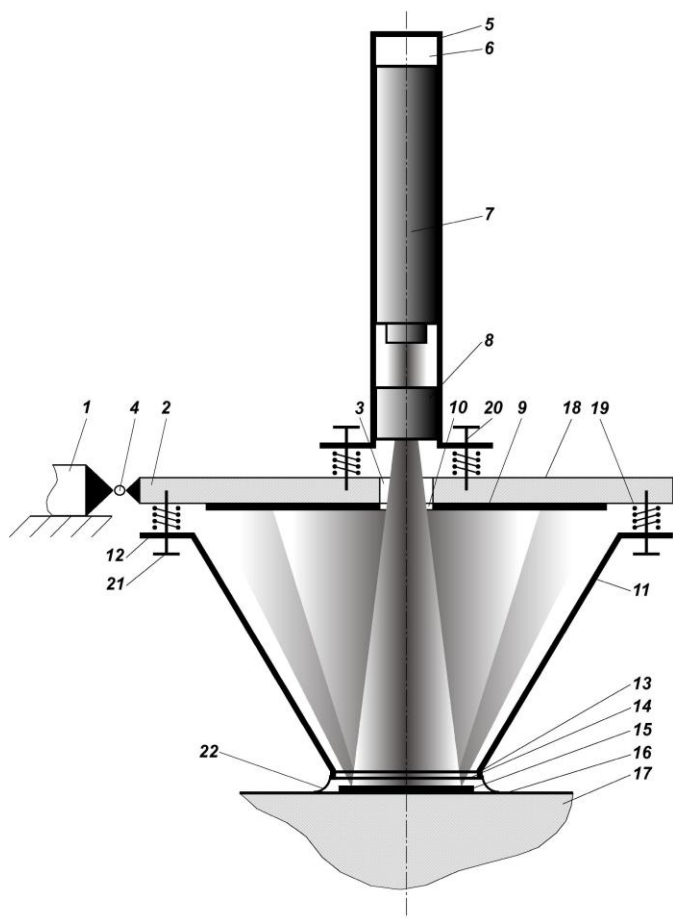


Рис. 13

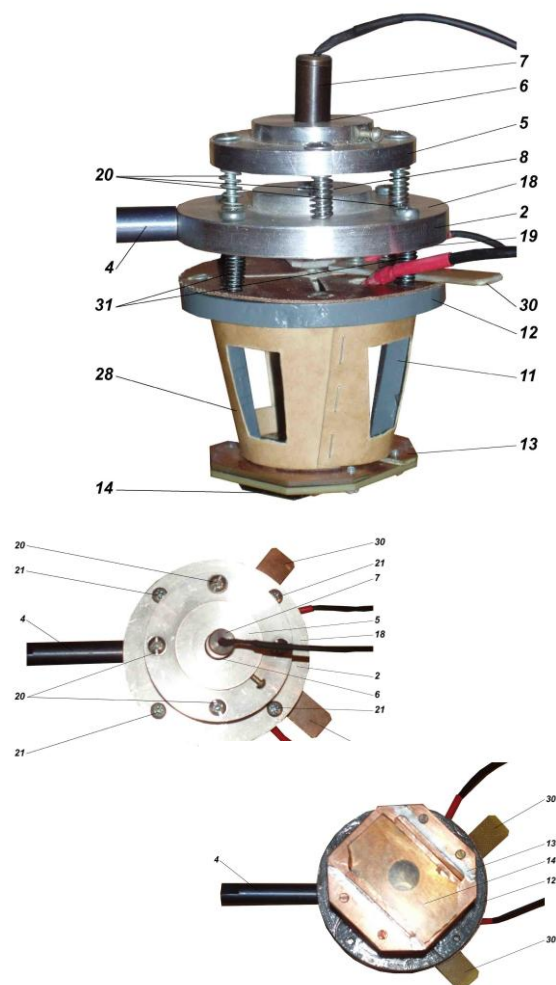


Рис. 14

Представленные результаты *опубликованы* в монографии [1] и **24** научных статьях [2-25] в центральных Российских и зарубежных изданиях.

Представленные технические и технологические решения *защищены* **7** патентами Российской Федерации на изобретения [26-32], а программное обеспечение - **7** свидетельствами Российской Федерации о государственной регистрации программ для ЭВМ [33-39].

Представленные результаты *докладывались, обсуждались и получили одобрение специалистов* на:

- International Symposium on "Physics and Mechanics of New Materials and Underwater Applications" (PHENMA - 2013) (Kaohsiung, Taiwan, 2013) [40-41];
- Международной научно-практической конференции «Транспорт - 2013» (Ростов н/Д, Россия, 2013) [42];
- XXVI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-26) (Н. Новгород, Россия, 2013) [43];

- XIV Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, Россия, 2013) [44];
- Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Ростов н/Д, Россия, 2013) [45];
- Russian-Taiwanese Symposium “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (Rostov-on-Don, Russia, 2012) [46-47];
- Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт - 2012» (Ростов н/Д, Россия, 2012) [48-49];
- Международной конференции «Механика и трибология транспортных систем» (Ростов н/Д, Россия, 2011) [50] и др.

Представленные технические и технологические решения *экспонировались* на:

- The 17-th International Salon of Research and Technological Transfer «INVENTICA - 2013» (Iasi, Romania, 2013) (XVII Международном Салоне изобретательства, исследований и трансфера технологий «INVENTICA - 2013» (Яссы, Румыния, 2013) [51];
- XVI Московском Международном салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед - 2013» (Москва, Россия, 2013) [52];
- VIII Международном салоне изобретений и новых технологий «Новое время - 2012» (Севастополь, Украина, 2012) [53] и др., где *получили одобрение специалистов и были отмечены* высшей наградой Салона «INVENTICA - 2013» «Gold medal The Hamangia Thinker» и золотой медалью «Gold medal Inventica - 2013»; золотой медалью салона «Архимед - 2013» и 2 Дипломами Федеральной службы по интеллектуальной собственности; Специальным призом Всемирного форума исследователей и изобретателей и 3 золотыми медалями салона «Новое время - 2012».

Представленные технические и технологические решения *изготовлены* в виде полномасштабных измерительных средств, экспериментально-измерительных лабораторных установок, демонстрационных моделей и *использованы* при решении актуальных научных и производственных задач по исследованию прочностных характеристик конструкционных материалов, разработке новых методов контроля качества конструкционных материалов и конструкций и т.п.

Полученные результаты также были *успешно применены* в процессе исследования процессов дефектообразования в ленточных высокотемпературных сверхпроводниках и разработке технологии их контроля качества в процессе изготовления [6].

Научные новизна и значимость полученных результатов подтверждается патентами Российской Федерации на изобретения [26-32], свидетельствами Российской Федерации о государственной регистрации программ для ЭВМ [33-39], многочисленными публикациями в центральных Российских и зарубежных изданиях [1-25], положительными отзывами специалистов, полученными на Международных и Всероссийских научно-технических и на-

учно-практических конференциях [40-50], а также при экспонировании разработанных технических и технологических решений на Международных салонах изобретений и новых технологий [51-53].

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что на момент представления работы на конкурс предлагаемые технические и технологические решения многократно использованы и продолжают использоваться в настоящее время при решении актуальных научных и производственных задач.

Достоверность полученных результатов основывается на результатах проведенного расчетно-экспериментального моделирования и исследований функциональных (эксплуатационных) характеристик предлагаемых технических и технологических решений, а также на сравнении с известными техническими и технологическими решениями.

Предлагаемые технические и технологические решения могут быть также **применены** в процессе высокоточных измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля при проведении экспериментальных исследований перспективных конструкций, оценке их состояния и диагностике, при исследовании акустико-эмиссионных процессов в твердых телах, исследовании процессов дефектообразования в новых материалах, исследовании волновых процессов в слоистых конструкциях и конструкциях, выполненных из анизотропных конструкционных материалов, в машиностроении, авиастроении, ракетно-космической технике и т.п.

***Заведующий кафедрой «Основы конструирования машин»
Донского государственного технического университета
кандидат технических наук доцент***

И.П. Мирошниченко

« 13 » августа 2013 года