



Методы контроля геометрических параметров и внутренних напряжений изделий аддитивных технологий

В. Л. Минаев, Г. Н. Вишняков, А. Д. Иванов, Г. Г. Левин
ФГУП «ВНИИ оптико-физических измерений»,
Москва, Россия

Созданию измерительных систем для аддитивных процессов препятствует проблема отсутствия систем диагностики и контроля изготавливаемых изделий. Качество деталей, полученных методами аддитивных технологий, сильно варьируется из-за неадекватных допусков размеров, шероховатости поверхности, а также дефектов и наличия полей механических напряжений. Это приводит к тому, что малейшие отклонения внешних условий, возникающие в процессе изготовления, могут вызвать несоответствие конечного изделия по форме или свойствам. Измерительная система должна иметь потенциальную возможность быть встроенной в единый производственный комплекс. Это связано с тем, что результат измерений геометрических параметров конкретных изделий необходимо сравнить с математической моделью, разработанной в CAD-системе, а измерения дефектов, скрытых напряжений, структуры изделий должны быть переданы в CAE-систему для принятия решения о годности изделия или разработки алгоритма и технологии его дальнейшей обработки. Для контроля параметров изделий аддитивных технологий предложена система на базе методов структурированного света и шерографии.

Ключевые слова: аддитивные технологии, контроль параметров, шерография

Methods for Controlling Geometric Parameters and Internal Stresses of Additive Technology Products

V. L. Minaev, G. N. Vishnyakov, A. D. Ivanov, G. G. Levin
FSUE "All-Russian Research Institute of Optical Physics Measurements", Moscow, Russia

The creation of measuring systems for additive processes is hindered by the lack of diagnostic and control systems for manufactured products. The quality of the parts obtained by the methods of additive technologies varies greatly due to inadequate dimensional tolerances, surface roughness, as well as defects and the presence of fields of mechanical stresses. This leads to the fact that the slightest deviation of external conditions arising in the manufacturing process, can cause a mismatch of the final product in shape or properties. The measuring system should have the potential to be integrated into a single production complex. This is due to the fact that the result of measuring the geometric parameters of specific products must be compared with the mathematical model developed in the CAD system, and measurements of defects, latent stresses, product structures must be transferred to the CAE system to decide on the suitability of the product or to develop an algorithm and technologies for its further processing. To control the parameters of products of additive technologies, a system based on the methods of structured light and shearography is proposed.

Keywords: additive technologies, parameters control, shearography

Статья получена: 20.12.2019

Статья принята к публикации: 14.01.2020

Received: 20.12.2019

Accepted: 14.01.2020



ВВЕДЕНИЕ

Цифровые технологии, развитие которых определяет современное состояние страны, включает в себя, как одно из основных звеньев, аддитивные технологии, обеспечивающие развитие промышленных производств нового поколения и модернизацию традиционных отраслей промышленности. Технология «трехмерной печати» (3D) начала развиваться в конце 80-х годов прошлого века. Пионером в этой области является компания 3D Systems, которая разработала в 1986 году первый аппарат – Stereolithography Apparatus. Первые лазерные машины – стереолитографические (SLA) и затем порошковые (SLS-машины) – отличались очень высокой стоимостью, выбор материалов был достаточно узкий, до середины 90-х годов они использовались главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. В дальнейшем после широкого распространения цифровых технологий в области проектирования, моделирования и механообработки 3D-технологии начали бурно развиваться.

Для 3D-технологий в настоящее время рекомендованы два основных термина со словом «аддитивные» – Additive Fabrication (AF) и Additive Manufacturing (AM), при этом большинство склоняется к последнему. Мировой рынок аддитивных технологий с 2010 по 2015 год прирастал в среднем на 27% в год и достиг объема в 5,1 млрд долларов, из которых примерно 40% приходится на оборудование и материалы, а 60% – на инжиниринговые услуги (разработка математических моделей, технологий и синтез деталей).

При разработке технологии послойного синтеза используются компьютерные технологии для моделирования и производства изделий – системы CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing). В последние годы в автоматизированные системы включают и CAE (Computer-Aided Engineering) – системы, предназначенные для оценки поведения реального изделия в условиях эксплуатации методами математического моделирования при помощи расчетных методов (метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объемов) для того, чтобы оценить, как поведет себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации. Технологии CAD/CAM/CAE имеют наиболее широкое и существенное влияние на ускорение инноваций, сокращение и снижение стоимости разработок новых продуктов, и, как следствие, повышение конкурентоспособности.

Все изделия, создаваемые по аддитивным технологиям, обязательно используют CAD/CAM/CAE

INTRODUCTION

Digital technologies, the development of which determines the current state of the country, includes, as one of the main links, additive technologies that ensure the development of new generation industrial production and the modernization of traditional industries. The technology of “three-dimensional printing” (3D) began to develop in the late 80s of the last century. The pioneer in this area is 3D Systems, which developed the first device, the Stereolithography Apparatus, in 1986. The first laser machines – stereolithographic (SLA) and then powder (SLS) machines – were very expensive, the choice of materials was quite narrow, until the mid-90s they were mainly used in research and development activities related to defense industry. In the future, after the widespread dissemination of digital technologies in the field of design, modeling and machining, 3D technologies began to develop rapidly.

For 3D-technologies, two main terms with the word “additive” are currently recommended – Additive Fabrication (AF) and Additive Manufacturing (AM), while most tend to the latter. From 2010 to 2015, the global market for additive technologies grew by an average of 27% per year and reached a volume of \$5.1 billion, of which approximately 40% are equipment and materials, and 60% are engineering services (development of mathematical models, technology and synthesis of parts).

In developing the technology of layer-by-layer synthesis, computer technologies are used for modeling and manufacturing products – CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing) systems. In recent years, computer-aided engineering (CAE) systems have also been included in automated systems – systems designed to assess the behavior of a real product under operating conditions using mathematical modeling methods using calculation methods (finite element method, finite difference method, finite volume method) in order to evaluate how the computer model of the product will behave under real operating conditions. CAD/CAM/CAE technologies have the broadest and most significant impact on accelerating innovation, reducing and lowering the cost of developing new products, and, as a result, increasing competitiveness.

All products created using additive technologies must use CAD/CAM/CAE systems. They include the synthesis of parts of complex technical systems, including the development of 3D models, construction of supports, synthesis technologies (radiation power, scanning strategy, scanning speed and step, etc.). At the same time, the process of formation of the structural-phase state of new-generation metal, ceramic and polymer materials in the process of additive technologies with



системы. Они включают в себя синтез деталей сложных технических систем, включая разработку 3D-моделей, конструирование поддержек, технологий синтеза (мощность излучения, стратегия сканирования, скорость и шаг сканирования и др.). При этом учитывается процесс формирования структурно-фазового состояния металлических, керамических и полимерных материалов нового поколения в процессе аддитивных технологий с последующей термической и баротермической обработкой деталей ответственного назначения.

Основной проблемой, которая препятствует широкому внедрению аддитивных технологий, является отсутствие систем диагностики и контроля изготавливаемых изделий. Качество деталей, полученных методами аддитивных технологий, сильно варьируется из-за неадекватных допусков размеров, шероховатости поверхности, а также дефектов, тем самым ограничивая широкое применение этих технологий. Эта изменчивость может быть сведена к минимуму за счет управления процессом, но нет адекватных измерительных процессов, доступных сегодня. Это приводит к тому, что малейшие отклонения внешних условий, возникающие в процессе изготовления, обуславливают несоответствия конечного изделия по форме или свойствам.

Чрезвычайно важно также осуществлять контроль деталей, формируемых с использованием аддитивных технологий, на наличие дефектов. В силу особенностей физических процессов, происходящих при формировании таких изделий, в них могут возникать не только дефекты, обычно свойственные применяемым материалам, но и поля механических напряжений. Учитывая, что использование аддитивных технологий наиболее целесообразно при изготовлении дорогих изделий сложной формы и с заданными свойствами, контроль за технологическими процессами и диагностика конечных изделий являются одним из ключевых звеньев в широком распространении этих технологий.

При этом необходимо отметить, что результат измерений геометрических параметров конкретных изделий необходимо сравнить с математической моделью, разработанной в CAD-системе, а измерения дефектов, скрытых напряжений, структуры изделий должны быть переданы в CAE-систему для принятия решения о годности изделия или разработки алгоритма и технологии его дальнейшей обработки. Таким образом, измерительная система должна иметь потенциальную возможность быть встроенной в единый производственный комплекс.

the subsequent thermal and barothermic processing of critical parts is taken into account.

The main problem that prevents the widespread adoption of additive technologies is the lack of diagnostic systems and control of manufactured products. The quality of parts obtained by additive technology varies greatly due to inadequate dimensional tolerances, surface roughness, as well as defects, thereby limiting their widespread use. This variability can be minimized by process control, but there are no adequate measurement processes available today. This leads to the fact that the slightest deviations of external conditions arising during the manufacturing process, cause the discrepancy of the final product in shape or properties.

It is also extremely important to monitor parts formed using additive technologies for defects. Due to the peculiarities of the physical processes occurring during the formation of such products, not only defects, usually characteristic of the materials used, but also fields of mechanical stresses can arise in them. Given that the use of additive technologies is most appropriate in the manufacture of expensive products of complex shape and with desired properties, control of technological processes and diagnostics of final products is one of the key links in the wide distribution of these technologies.

It should be noted that the result of measuring the geometric parameters of specific products must be compared with the mathematical model developed in the CAD system, and measurements of defects, latent stresses, product structures must be transferred to the CAE system to decide on the suitability of the product or to develop an algorithm and technologies for its further processing. Thus, the measuring system should have the potential to be integrated with a single production complex.

When creating measuring systems for additive technologies, a combination of various methods of reliable non-destructive testing can be used, which in the general case requires solving the following problems. First, in each case, it is necessary to determine a list of characteristics of products of additive production that need measurements. Secondly, determine the most appropriate measurement methods that allow you to create a system for assessing the quality of products of additive production. Analysis of modern industrial technologies allows us to formulate the basic requirements for measuring and diagnostic equipment that are used in their implementation. These include: non-contact measurements, high performance, on-site measurements, high detectability of defects, measurement of characteristics that form impacts on the material in real time. Thirdly, to develop methods and equipment for non-destructive

При создании измерительных систем для аддитивных технологий может быть использована совокупность различных методов достоверного неразрушающего контроля, что в общем случае требует решения следующих задач: во-первых, в каждом конкретном случае необходимо определить перечень характеристик изделий аддитивного производства, которые нуждаются в измерениях; во-вторых, определить наиболее адекватные методы измерения, которые позволяют создать систему оценки качества продукции аддитивного производства. Анализ современных промышленных технологий позволяет сформулировать основные требования к измерительному и диагностическому оборудованию, которые применяются при их реализации. К ним относятся: бесконтактность измерений, высокая производительность, проведение измерений на месте, высокая обнаружительная способность дефектов, измерение характеристик, формирующих воздействий на материал в реальном времени; в-третьих, разработать методы и оборудование неразрушающего контроля изделий, получаемых с использованием аддитивных технологий, с необходимым уровнем достоверности. Создать соответствующие средства измерений и разработать систему их метрологического обеспечения. Разработать методики метрологического контроля и испытаний изделий, изготовленных послойным синтезом; наконец, что может быть самое важное, максимально встроить созданные измерительные системы в комплексную систему цифрового производства. Это требует создания специализированного программного обеспечения, сопряженного с современными CAD/CAM/CAE системами.

В настоящее время во ФГУП «ВНИИОФИ» проводятся работы по созданию методов и средств измерений параметров изделий аддитивного производства, а именно:

- измерение геометрических параметров в широком диапазоне размеров изделий методами структурированного света;
- измерение деформаций и напряженных состояний методами спекл-интерферометрии.

Далее подробно рассмотрим эти методы.

Физический мир вокруг нас является трехмерным (3D); тем не менее обычные камеры способны получать только двухмерные изображения (2D), у которых отсутствует информация о глубине. Это фундаментальное ограничение значительно сужает способность воспринимать и понимать сложность объектов реального мира. Несколько прошедших десятилетий отмечены огромным прогрессом в исследовании, развитии и коммерциализации технологий

testing of products obtained using additive technologies with the necessary level of reliability. Create appropriate measuring instruments and develop a system of their metrological support. To develop methods of metrological control and testing of products made by layered synthesis. Finally, what may be most important, integrate the created measuring systems into a comprehensive digital production system as much as possible. This requires the creation of specialized software interfaced with modern CAD/CAM/CAE systems.

Currently, FSUE "All-Russian Research Institute of Optical Physics Measurements" is working on the creation of methods and means for measuring the parameters of additive manufacturing products, namely:

- measurement of geometric parameters in a wide range of product sizes using structured light methods;
- measurement of strains and stresses by speckle interferometry methods.

Next, we consider these methods in detail.

The physical world around us is three-dimensional (3D); however, conventional cameras can only receive two-dimensional (2D) images that do not have depth information. This fundamental limitation significantly narrows the ability to perceive and understand the complexity of real-world objects. The past few decades have been marked by tremendous progress in the research, development and commercialization of imaging technologies, which has been stimulated by the needs of applications in various market segments, progress in the development of sensors for electronic processing of images with high resolution and high speed, as well as increasing computing power.

The task of obtaining three-dimensional images relates to those methods that allow you to capture genuine 3D data, i.e. the values of some parameters of a three-dimensional object, such as a density distribution, depending on three-dimensional coordinates (x, y, z) . Examples of obtaining images from the field of medicine are computed tomography (CT), NMR imaging, during which volume pixels (or voxels) of the measured object are obtained, including its internal structure.

In contrast, when acquiring an image, surfaces deal with measuring the coordinates (x, y, z) of a point on an object. Since in the general case the surface is not flat, it is described in three-dimensional space, and therefore the measurement result can be considered as a map of depth z depending on the position (x, y) in the Cartesian coordinate system, and represent it in the form of a matrix $\{z_{ij} = (x_i, y_j), i=1, 2, \dots, L, j=1, 2, \dots, M\}$. This process also has many other names: 3D surface measurement, distance determination, distance measurement,

получения изображения, который стимулировался потребностями применения в различных сегментах рынка, прогрессом в сфере создания датчиков для электронной обработки изображений с высоким разрешением и высокой скоростью, а также все увеличивающейся вычислительной мощностью.

Задача получения трехмерных изображений относится к тем методам, которые позволяют захватывать подлинные 3D-данные, т.е. величины некоторых параметров трехмерного объекта, таких как распределение плотности в зависимости от трехмерных координат (x, y, z) . Примерами получения изображений из области медицины являются компьютерная томография (КТ), ЯМР-томография, в процессе которых получают объемные пиксели (или воксели) измеряемого объекта, включая его внутреннюю структуру.

В отличие от этого, при получении изображения поверхности имеют дело с измерением координат (x, y, z) точки на объекте. Так как в общем случае поверхность не является плоской, она описывается в трехмерном пространстве, и поэтому результат измерения можно рассматривать как карту глубины z в зависимости от положения (x, y) в декартовой системе координат и представить ее в виде матрицы $\{z_{ij} = (x_i, y_j), i=1, 2, \dots, L, j=1, 2, \dots, M\}$. Этот процесс имеет также много других названий: 3D-измерение поверхности, определение расстояний, измерение расстояний, глубинное картографирование, сканирование поверхности и т.д. Эти термины используются в различных сферах применения и обычно относятся к различным методам получения данных, отличающихся только деталями конструкции системы, реализацией и/или форматами данных.

Более общие системы получения трехмерных изображений поверхностей способны регистрировать скалярную величину, такую как коэффициент отражения, связанный с каждой точкой на неплоской поверхности. Результатом является облако точек $\{P_i = (x_i, y_i, z_i, f_i), i=1, 2, \dots, N\}$, где f_i представляет собой коэффициент отражения в каждой i -ой точке поверхности в массиве данных. Аналогично цветное изображение поверхности представляется с помощью $\{P_i = (x_i, y_i, z_i, r_i, g_i, b_i), i=1, 2, \dots, N\}$, где вектор (r_i, g_i, b_i) представляет составляющие красного, зеленого и синего цвета, связанные с i -ой точкой поверхности. Спектральные свойства поверхности также могут быть описаны с помощью векторов большей величины.

Один из главных методов получения трехмерных изображений поверхности основывается на использовании «структурированного света», т.е. освеще-

depth mapping, surface scanning, etc. These terms are used in various fields of application and usually refer to different methods of obtaining data that differ only in the details of the system design, implementation and/or data formats.

More general systems for obtaining three-dimensional surface images are able to register a scalar value, such as the reflection coefficient associated with each point on a non-planar surface. The result is a point cloud $\{P_i = (x_i, y_i, z_i, f_i), i=1, 2, \dots, N\}$, where f_i is the reflection coefficient at each i -th point of the surface in the data array. Similarly, a color image of the surface is represented using $\{P_i = (x_i, y_i, z_i, r_i, g_i, b_i), i=1, 2, \dots, N\}$, where vector (r_i, g_i, b_i) represents the red, green and blue components associated with the i -th point. The spectral properties of a surface can also be described using larger vectors.

One of the main methods for obtaining three-dimensional surface images is based on the use of “structured light”, i.e. illumination of an object using specially designed two-dimensional templates (banners) with intensity varying in space and subsequent registration, and analysis of the images obtained. As shown in Figure 1, a spatially changing two-dimensional structured illumination is generated using a special projector or a light source modulated with a spatial light modulator. The intensity of each pixel in the structured light pattern is represented by a digital signal $\{I_{ij} = (i, j), i=1, 2, \dots, L, j=1, 2, \dots, J\}$, where (i, j) are the coordinates (x, y) of the projected template. Typically projected structured light patterns are two-dimensional patterns.

To obtain a two-dimensional image of a scene illuminated by structured light, a camera is used. The optical axis of the projector and camera should form a certain angle. If the scene is a flat surface without any spatial variations of the surface, then the pattern displayed on the image is similar to the projected pattern of structured light. However, if the surface of the scene is non-planar, then its irregularities distort the projected pattern of structured light. The principle of the method of obtaining a three-dimensional surface image using structured light is to identify the three-dimensional surface shape based on the distortion of the projected structured light pattern. The accurate profiles of three-dimensional surfaces of objects in a scene can be calculated using various principles and algorithms of structured light.

As shown in Fig. 1, the geometric relationship between the camera, the structured light projector and the point P on the surface of the object can be expressed using the principle of triangulation, according to the formula:

ния объекта с использованием специально разработанных двухмерных шаблонов (транспарантов) с изменяющейся в пространстве интенсивностью и последующей регистрацией и анализом полученных изображений. Как показано на рисунке 1, изменяющееся в пространстве двухмерное структурированное освещение генерируется с помощью специального проектора или источника света, подвергнутого модуляции с помощью пространственного модулятора света. Интенсивность каждого пиксела на шаблоне структурированного света представляется цифровым сигналом $\{I_{ij}=(i,j), i=1,2,\dots,I, j=1,2,\dots,J\}$, где (i,j) представляют собой координаты (x,y) проецируемого шаблона. Обычно проецируемые шаблоны структурированного света являются двухмерными шаблонами.

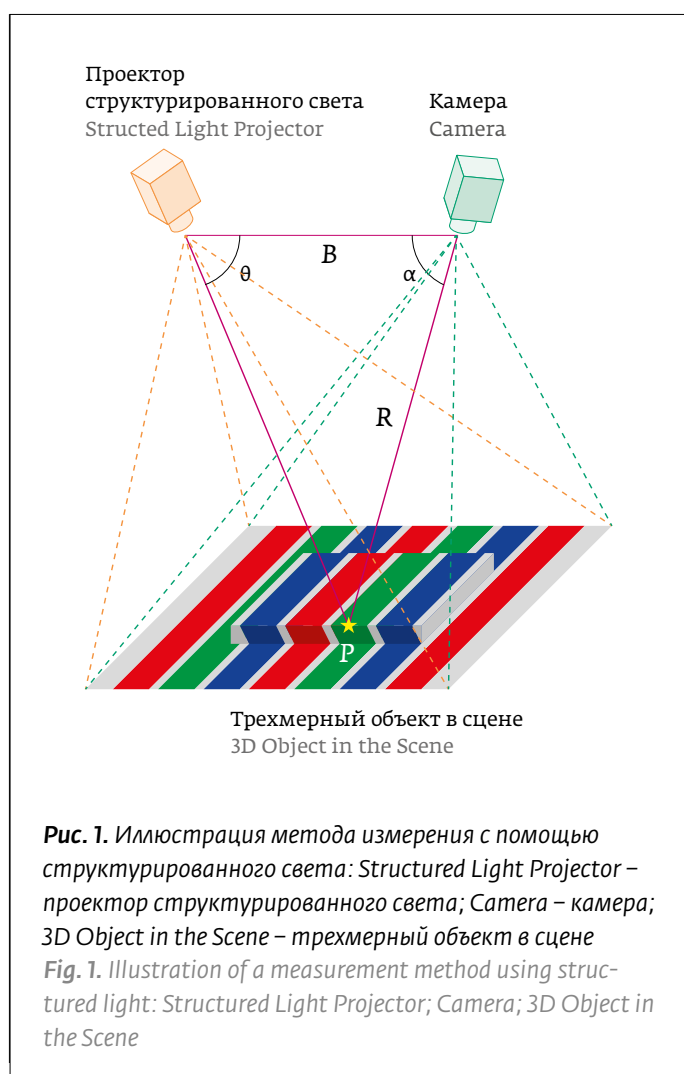
Для получения двухмерного изображения сцены, освещаемой структурированным светом, используется камера. Оптические оси проектора и камеры должны образовывать некоторый угол. Если сцена представляет собой плоскую поверхность без каких-либо пространственных вариаций поверхности, то шаблон, отображаемый на полученном изображении, аналогичен проецируемому шаблону структурированного света. Однако если поверхность сцены неплоская, то ее неровности искажают проецируемый шаблон структурированного света. Принцип метода получения трехмерного изображения поверхности с помощью структурированного света заключается в выявлении трехмерной формы поверхности на основе искажения проецируемого шаблона структурированного света. Точные профили трехмерных поверхностей объектов в сцене могут быть рассчитаны посредством использования различных принципов и алгоритмов структурированного света.

Как показано на рис. 1, геометрическая связь между камерой, проектором структурированного света и точкой Р на поверхности объекта может быть выражена с помощью принципа триангуляции по формуле:

$$R = B \frac{\sin \theta}{\sin(\alpha + \theta)}. \quad (1)$$

Ключевым моментом для получения трехмерного изображения на основании триангуляции является способ идентификации отдельного элемента проецируемого шаблона на полученном изображении.

В более общем смысле шаблоны структурированного света могут создавать пространственные вариации по всем направлениям (x,y,z) , становясь, таким образом, подлинными 3D-системами проецирования структурированного света. Например,



$$R = B \frac{\sin \theta}{\sin(\alpha + \theta)}. \quad (1)$$

The key to obtaining a three-dimensional image based on triangulation is a method for identifying a single element of a projected template in the resulting image.

In a more general sense, structured light patterns can create spatial variations in all directions (x,y,z) , thus becoming genuine 3D structured light projection systems. For example, the intensity of the projected light may vary along the optical path due to interference of coherent light. However, most systems for obtaining three-dimensional surface images using structured light use two-dimensional patterns.

Fig. 2 presents a system for obtaining three-dimensional images when illuminated with structured light, demonstrating the principle of its operation. An arbitrary three-dimensional surface of an object is illuminated using a projected pattern of structured light. In this particular case, the structured light pat-

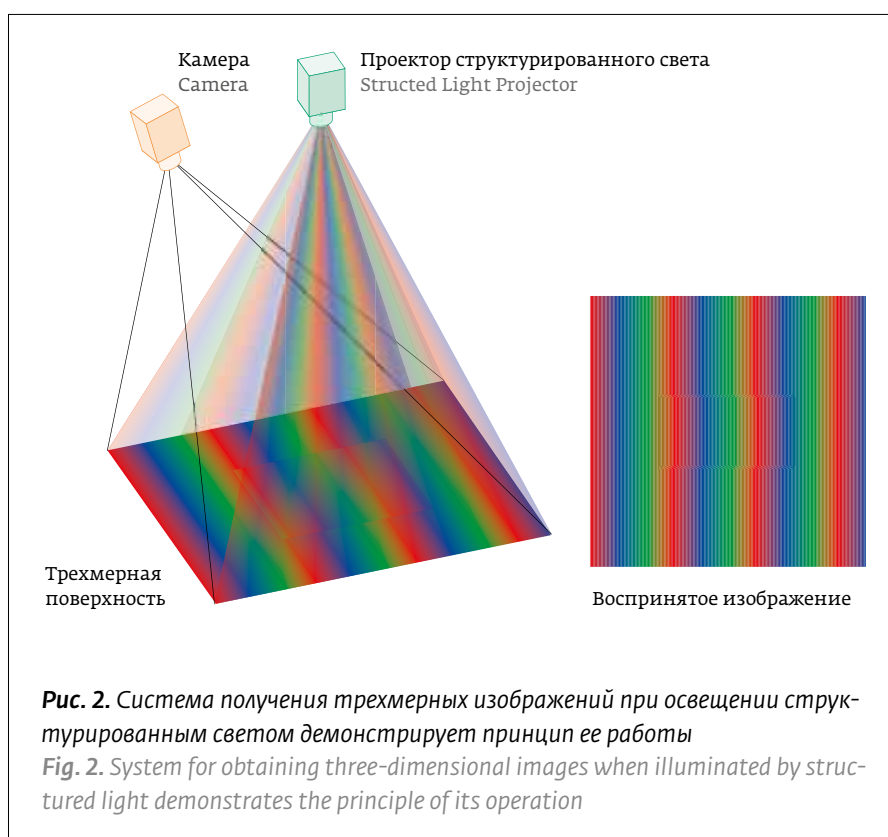
интенсивность проецируемого света может меняться вдоль оптического пути вследствие интерференции когерентного света. Однако большинство систем получения трехмерного изображения поверхности с помощью структурированного света используют двухмерные шаблоны.

На рис. 2 представлена система получения трехмерных изображений при освещении структурированным светом, демонстрирующая принцип ее работы. Произвольная трехмерная поверхность объекта освещается с использованием проецируемого шаблона структурированного света. В этом конкретном случае шаблон структурированного света представляет собой пространственно повторяющуюся на протяжении множества периодов цветную картину, напоминающую спектр излучения видимого оптического диапазона. Камера захватывает изображение трехмерной поверхности объекта при освещении структурированным светом. На основании искажения шаблона структурированного света, видимого на полученном изображении, в сравнении с неискаженным проецированным шаблоном, может быть точно рассчитана трехмерная геометрическая поверхность объекта.

В обзорах [1, 2] и монографии [3] рассмотрены различные методы проекции полос, причем обзор [2] делает акцент только на однокадровые методы, которые можно применять для исследования динамических объектов.

Во ФГУП «ВНИИОФИ» разработан сканер-профилометр для измерения формы поверхности для стоматологии. В стоматологических CAD/CAM системах цифровые 3D изображения зубов используются для автоматизированного изготовления зубных реставраций (коронки, протезов и т.п.). Внешний вид сканера-профилометра приведен на рис. 3.

Данное устройство реализует триангуляционную схему измерения. Результаты работы сканера показали достаточную точность для его использования в области стоматологии, которая составила до 45,5 мкм. Для определения метрологических характеристик сканера был разработан комплект специальных мер. Кроме того, были проведены экспериментальные исследования по измерению формы



tern is a color picture spatially repeated over many periods that resembles the radiation spectrum of the visible optical range. The camera captures an image of the three-dimensional surface of an object when illuminated by structured light. Based on the distortion of the structured light pattern visible in the image, compared with the undistorted projected pattern, the three-dimensional geometric surface of the object can be accurately calculated.

In the reviews [1, 2] and the monograph [3], various strip projection methods are considered, and the review [2] focuses only on single-frame methods that can be used to study dynamic objects.

The team of scientists of FSUE “All-Russian Research Institute of Optical Physics Measurements” developed a scanner-profilometer to measure the surface shape for dentistry. In dental CAD/CAM systems, digital 3D images of teeth are used for the automated production of dental restorations (crowns, prostheses, etc.). The appearance of the scanner-profilometer is shown in Fig. 3.

This device implements a triangulation measurement scheme. The results of the scanner showed sufficient accuracy for its use in the field of dentistry, which amounted to 45.5 microns. A set of special measures was developed to determine the metrological characteristics of the scanner. In addition, experimental studies

поверхности различных объектов. К примеру, в эксперименте по определению формы использовался тестовый объект в виде усеченного конуса. Размеры тестового объекта: основание – 10×10 мм, высота усеченного конуса – 6 мм, угол между образующей поверхностью конуса и его высотой – 10°. На рис. 4 приведены изображения, полученные при помощи профилометра.

Форма поверхности, полученная при измерении, сравнивалась с исходной CAD-моделью. СКО измеренной поверхности тестового объекта от базовой в областях соответствующих плоскостей составляет 45,5 мкм, максимальное отклонение – 74,5 мкм.

Электронная спекл-интерферометрия (Electronic Speckle Pattern Interferometry ESPI) является методом, похожим на голографическую интерферометрию: она предназначена для измерения изменений оптического пути, вызванного деформацией непрозрачных тел или изменением показателя преломления внутри прозрачных сред [4]. В методе ESPI для записи оптической информации используются электронные приборы, например ПЗС-камеры. Спекл-картина, которая записывается с помощью ESPI системы, может рассматриваться как голограмма сфокусированного изображения диффузно отражающего объекта (рис. 5). Благодаря цифровой записи и обработке метод ESPI также называют цифровой спекл-интерферометрией (Digital Speckle Pattern Interferometry DSPI). Другое название – ТВ-голография. Однако, вместо реконструкции изображения с голограммы в методе ESPI используют корреляцию спекл-картин.

Принципиальная схема ESPI приведена на рис. 5. Изображение объекта на ПЗС-матрице строится системой линз. Из-за когерентности освещающего излучения изображение объекта будет представлять собой спекл-картину.

Размер отдельного спекла $d_{sp} = \lambda b / a$, где λ – длина волны излучения, a – диаметр апертуры линзы, b – расстояние от линзы до плоскости изображения (рис. 5). Размер спекла должен быть согласован с разрешением (размером пиксела) матричного приемника. Этого можно достичь уменьшением апертуры отображающей системы.

Спекл-картина поверхности объекта на матричном приемнике совмещается со сферической опорной волной. Точечный



Рис. 3. Интраоральный оптический профилометр
Fig. 3. Intraoral optical profiler

were conducted to measure the surface shape of various objects. For example, in the experiment to determine the shape, a test object in the form of a truncated cone was used. The dimensions of the test object: the base is 10 × 10 mm, the height of the truncated cone is 6 mm, the angle between the generatrix surface of the cone and its height is 10°. In fig. Figure 4 shows the images obtained using the profilometer.

The surface shape obtained during the measurement was compared with the original CAD model. The standard deviation of the measured surface of the test object from the base in the areas of the respective planes is 45.5 μm, the maximum deviation is 74.5 μm.

Electronic speckle interferometry (Electronic Speckle Pattern Interferometry ESPI) is a method similar to holographic interferometry, it is designed to measure

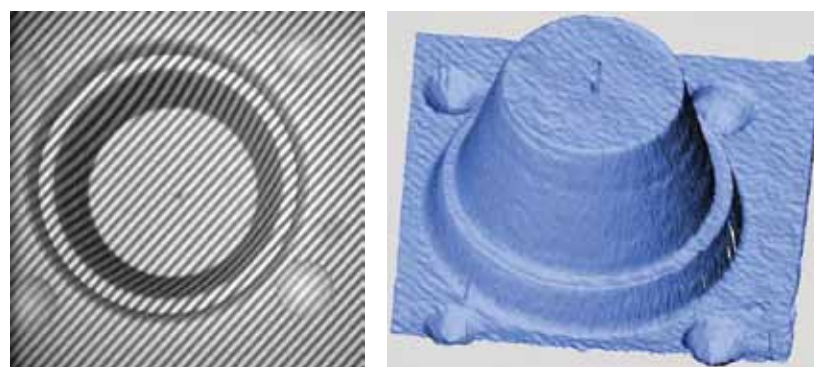


Рис. 4. Изображение меры в структурированном свете (слева) и восстановленный трехмерный профиль меры (справа)
Fig. 4. Image of the measure in structured light (left) and the restored three-dimensional profile of the measure (right)

источник этой опорной волны должен быть расположен в центре отображающей линзы. Благодаря такой осевой (in-line) схеме пространственный период интерференционных полос будет больше размера пиксела ПЗС-матрицы. На практике система формирования опорного пучка соединена со светоделительным кубиком или же через оптическое волокно вмонтировано прямо в апертуру отображающей линзы.

Интенсивность света на матричном приемнике равна:

$$I_A(x, y) = |a_R(x, y) \exp(i\varphi_R) + a_o(x, y) \exp(i\varphi_0)|^2 = a_R^2 + a_o^2 + 2a_R a_o \cos(\varphi_0 - \varphi_R), \quad (2)$$

где $a_R \exp(i\varphi_R)$ – комплексная амплитуда опорной волны, $a_o \exp(i\varphi_0)$ – комплексная амплитуда объектной волны в плоскости изображения. Выражение $(\varphi_0 - \varphi_R)$ есть разность фаз между опорной и объектными волнами, которая случайным образом изменяется от точки к точке. Эта голограмма сфокусированного изображения диффузно отражающего объекта регистрируется матричным приемником и записывается в память компьютера.

Таким образом, выражение (2) описывает низкочастотную голограмму сфокусированного изображения объекта, которая представляет собой спеклы, промодулированные интерференционными полосами. Такую низкочастотную голограмму можно также назвать спекл-интерферограммой.

Устройство, изображенное на рис. 3, чувствительно к нормальным перемещениям в направлении, перпендикулярном плоскости объекта (out-of-plane). Смещение на величину d_z приводит к фазовому сдвигу:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d_z. \quad (3)$$

После деформации объекта записывается вторая голографическая спекл-картина:

$$I_B(x, y) = |a_R(x, y) \exp(i\varphi_R) + a_o(x, y) \exp(i\varphi_0 + \Delta\varphi)|^2 = a_R^2 + a_o^2 + 2a_R a_o \cos(\varphi_0 - \varphi_R + \Delta\varphi). \quad (4)$$

Далее эти две голографические спекл-картины вычитаются по формуле:

$$\Delta I = |I_A - I_B| = |2a_R a_o (\cos(\varphi_0 - \varphi_R) - \cos(\varphi_0 - \varphi_R + \Delta\varphi))| = 2a_R a_o \left| \sin\left(\varphi_0 - \varphi_R + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \right|. \quad (5)$$

Следует подчеркнуть, что вычитаются не волновые поля, а интенсивности двух спекл-картин

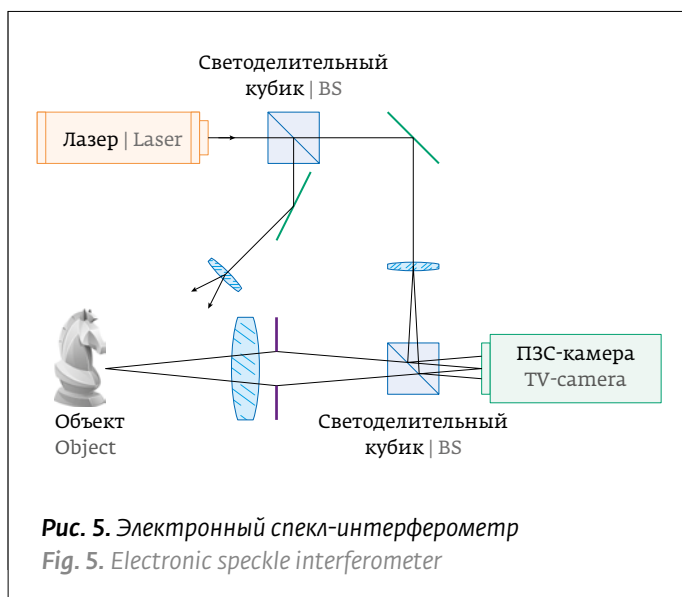


Рис. 5. Электронный спекл-интерферометр
Fig. 5. Electronic speckle interferometer

changes in the optical path caused by deformation of opaque bodies or a change in the refractive index inside transparent media [4]. The ESPI method uses electronic devices, such as CCD cameras, to record optical information. The speckle pattern, which is recorded using the ESPI system, can be considered as a hologram of a focused image of a diffusely reflecting object (Fig. 5). Thanks to digital recording and processing, the ESPI method is also called Digital Speckle Pattern Interferometry DSPI. Another name is TV holography. However, instead of reconstructing the image from the hologram, the ESPI method uses speckle pattern correlation.

The schematic diagram of ESPI is shown in Fig. 5. The image of the object on the CCD matrix is constructed by a lens system. Due to the coherence of the illuminating radiation, the image of the object will be a speckle picture.

The size of an individual speckle is $d_{sp} = \lambda b / a$, where λ is the radiation wavelength, a is the lens aperture diameter, and b is the distance from the lens to the image plane (Fig. 5). The speckle size should be consistent with the resolution (pixel size) of the matrix receiver. This can be achieved by reducing the aperture of the imaging system.

The speckle pattern of the surface of the object on the matrix receiver is combined with a spherical reference wave. The point source of this reference wave should be located in the center of the imaging lens. Thanks to this axial (in-line) scheme, the spatial period of the interference fringes will be larger than the pixel size of the CCD matrix. In practice, the system for forming the reference beam is connected to a beam splitting cube or is mounted directly into the aperture of the imaging lens through an optical fiber.

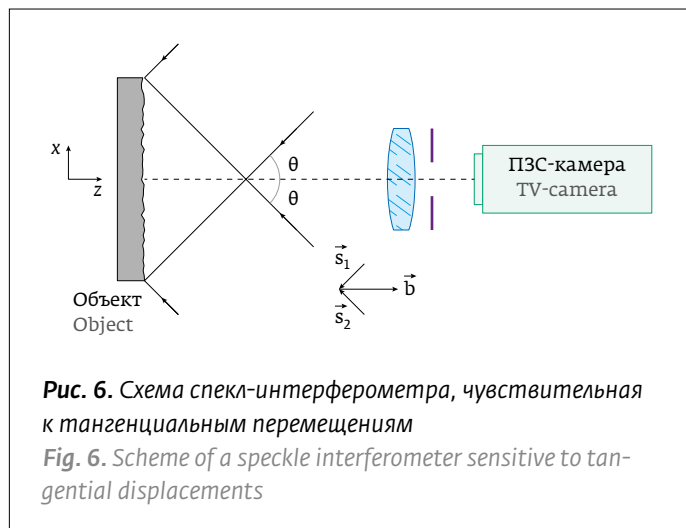
(голограмм). Из выражения (5) видно, что интенсивность разностной спекл-картины будет минимальна в тех точках, где $\Delta\varphi = 0, 2\pi, \dots$. Интенсивность разностной картины достигает максимума для тех участков поверхности объекта, для которых деформация (смещение) ведет к сдвигу фазы $\Delta\varphi = \pi, 3\pi, \dots$. Результирующая картина вычитания выглядит как система темных и светлых полос, очень похожих на голографическую интерферограмму. Однако есть существенное отличие от голографической интерферометрии, которое заключается в появлении спеклов в полосах и потере 3-х мерной информации при таком корреляционном процессе.

Как указывалось выше, схема на рис. 5 чувствительна только к нормальным перемещениям. Тангенциальные перемещения (in-plane) могут быть измерены с помощью схемы, изображенной на рис. 6. Две плоские волны освещают объект симметрично под углами $\pm\theta$ к оси z. Изображение объекта строится ТВ-камерой. Как и раньше, размер спеклов должен быть согласован с размером пиксела, например изменением диаметра апертуры линзы. Изменение фазы, вызванное тангенциальными смещениями, может быть выведено из простых геометрических соотношений, аналогичных вычислениям смещений в голографической интерферометрии. Изменение фазы верхнего пучка на рис. 6 равно:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d} \cdot (\vec{b} - \vec{s}_1), \quad (6)$$

где \vec{d} – вектор смещения. Единичные вектора $\vec{b}, \vec{s}_1, \vec{s}_2$ определены на рис. 3. Соответствующий сдвиг фазы для нижнего пучка равен:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d} \cdot (\vec{b} - \vec{s}_2). \quad (7)$$



The light intensity at the matrix receiver is equal to:

$$I_A(x, y) = |a_R(x, y) \exp(i\varphi_R) + a_o(x, y) \exp(i\varphi_o)|^2 = a_R^2 + a_o^2 + 2a_R a_o \cos(\varphi_o - \varphi_R), \quad (2)$$

where $a_R \exp(i\varphi_R)$ is the complex amplitude of the reference wave, and $a_o \exp(i\varphi_o)$ is the complex amplitude of the object wave in the image plane. The expression $(\varphi_o - \varphi_R)$ (is the phase difference between the reference and object waves, which randomly varies from point to point. This hologram of a focused image of a diffusely reflecting object is recorded by a matrix receiver and recorded in a computer memory.

Thus, expression (2) describes a low-frequency hologram of a focused image of an object, which is a speckle modulated by interference fringes. Such a low-frequency hologram can also be called a speckle interferogram.

The device shown in fig. 3, sensitive to normal movements, in a direction perpendicular to the plane of the object (out-of-plane). A shift by d_z leads to a phase shift:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d_z. \quad (3)$$

After the deformation of the object, the second holographic speckle pattern is recorded:

$$I_B(x, y) = |a_R(x, y) \exp(i\varphi_R) + a_o(x, y) \exp(i\varphi_o + \Delta\varphi)|^2 = a_R^2 + a_o^2 + 2a_R a_o \cos(\varphi_o - \varphi_R + \Delta\varphi). \quad (4)$$

Further, these two holographic speckle patterns are subtracted by the formula:

$$\Delta I = |I_A - I_B| = |2a_R a_o (\cos(\varphi_o - \varphi_R) - \cos(\varphi_o - \varphi_R + \Delta\varphi))| = 2a_R a_o \left| \sin\left(\varphi_o - \varphi_R + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \sin\frac{\Delta\varphi}{2} \right|. \quad (5)$$

It should be emphasized that it is not the wave fields that are subtracted, but the intensities of the two speckle patterns (holograms). It can be seen from expression (5) that the intensity of the difference speckle pattern will be minimal at those points where $\Delta\varphi = 0, 2\pi, \dots$. The intensity of the difference pattern reaches its maximum for those parts of the surface of the object for which deformation (displacement) leads to a phase shift $\Delta\varphi = \pi, 3\pi, \dots$. The resulting picture of the subtraction looks like a system of dark and light bands, very similar to a holographic interferogram. However, there is a significant difference from holographic interferometry, which consists in the appearance of speckles in the bands and the loss of 3D information in such a correlation process.

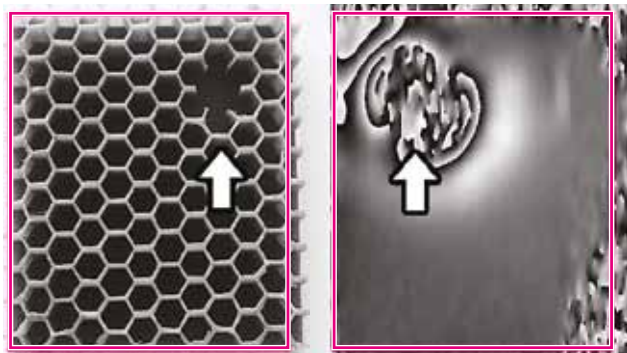


Рис. 7. Обнаружение дефекта при деформации изделия аддитивных технологий. Обратная сторона пластины (слева), разность двух фазовых изображений фронтальной поверхности пластины (справа). Стрелкой указано место дефекта

Fig. 7. Defect detection during deformation of an additive technology product. The back side of the plate (left), the difference between the two phase images of the front surface of the plate (right). The arrow indicates the location of the defect

Тогда полный фазовый сдвиг будет равен:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d}(\vec{s}_2 - \vec{s}_1). \quad (8)$$

Вектор $(\vec{s}_2 - \vec{s}_1)$ параллелен оси x , и его длина равна $2\sin\theta$. Следовательно, полный фазовый сдвиг, измеряемый в такой схеме, будет равен:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d_x \sin\theta.$$

Так же как в голографической интерферометрии, фаза не может быть определена по одной спекл-картине. Фаза из спекл-интерферограммы может быть восстановлена методом фазовых шагов. В этом методе фазовых шагов для ESPI необходимо зарегистрировать не менее 3-х спекл-интерферограмм с взаимным фазовым сдвигом в каждом состоянии (до и после нагрузки). Любой из известных алгоритмов фазовых шагов может быть использован.

В первоначальном состоянии методом фазовых шагов вычисляется разность фаз между опорным и объектным пучками $\varphi_0 - \varphi_R$. После деформации объекта опять же методом фазовых шагов вычисляется другая разность фаз $\varphi_0 - \varphi_R + \Delta\varphi$. Искомый сдвиг фаз $\Delta\varphi$, вызванный деформацией объекта, получается в результате вычитания этих двух сдвигов фаз.

As indicated above, the circuit in Fig. 5 is only sensitive to normal movements. Tangential displacements (in-plane) can be measured using the circuit shown in Fig. 6. Two plane waves illuminate the object symmetrically at angles $\pm\theta$ to the z axis. The image of the object is built by a TV camera. As before, the speckle size should be consistent with the pixel size, for example, by changing the diameter of the lens aperture. The phase change caused by tangential displacements can be inferred from simple geometric relationships similar to calculations of displacements in holographic interferometry. The phase change of the upper beam in Fig. 6 is equal to:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d}(\vec{b} - \vec{s}_1), \quad (6)$$

where \vec{d} is the displacement vector. The unit vectors \vec{b} , \vec{s}_1 , \vec{s}_2 are defined in Fig. 3. The corresponding phase shift for the lower beam is:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d}(\vec{b} - \vec{s}_2). \quad (7)$$

Then the total phase shift will be equal to:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d}(\vec{s}_2 - \vec{s}_1). \quad (8)$$

The vector $(\vec{s}_2 - \vec{s}_1)$ is parallel to the x axis and its length is $2\sin\theta$. Therefore, the total phase shift, measured in such a scheme, will be equal to:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d_x \sin\theta.$$

Just like in holographic interferometry, the phase cannot be determined from a single speckle pattern. The phase from the speckle interferogram can be reconstructed by the method of phase steps. In this phase step method for ESPI, it is necessary to register at least 3 speckle interferograms with mutual phase shift in each state (before and after the load). Any of the known phase-step algorithms can be used.

In the initial state, the phase difference between the reference and object beams $\varphi_0 - \varphi_R$ is calculated by the method of phase steps. After deformation of the object, again, by the method of phase steps, another phase difference $\varphi_0 - \varphi_R + \Delta\varphi$ is calculated. The desired phase shift caused by the deformation of the object is obtained by subtracting these two phase shifts.

It follows that in modern ESPI methods, the sought phase shift $\Delta\varphi$ is not restored from formula (5), i.e. not from the difference of two speckle interferograms, but from the speckle interferograms themselves by the phase-step method. Therefore, the difference between



НОВИНКА!

TomoScope XS

Новинка – впервые в России самый компактный измерительный томограф в мире – TomoScope XS производства Werth Messtechnik (Германия) для неразрушающего 3D контроля геометрии деталей с погрешностью до 4,5 мкм и поиска скрытых дефектов. TomoScope XS – большие возможности в малом формате!

198099, Россия, Санкт-Петербург,
Промышленная ул., д. 5
Тел.: (812) 335-09-75
E-mail: info@uran-spb.ru
www.uran-spb.ru



ФОТОНИКА-2020
Стенд №FD040



Отсюда следует, что в современных методах ЕСПИ искомым сдвиг фаз $\Delta\varphi$ восстанавливается не из формулы (5), т.е. не из разности двух спекл-интерферограмм, а из самих спекл-интерферограмм методом фазовых шагов. Поэтому стирается различие между методами цифровой голографической интерферометрии и электронной спекл-интерферометрии.

Для эксперимента по определению деформации использовался шерограф, представленный на рисунке 7(а), и плоская пластина размерами 55×45 мм, с одной стороны которой имелась ячеистая структура, изготовленная методом аддитивных технологий. В ячеистой структуре при печати был специально пропущен участок звеньев ячеек размерами 7×7 мм. Данный участок имитировал дефект отслоения поверхности от ячеистой подложки. Для получения деформированного состояния использовался нагрев пластины с помощью горячего воздуха. Качественное обнаружение данного дефекта с плоской стороны пластины показано на рис. 7.

Таким образом, представленные методы структурированного света и шерографии удовлетворяют требованиям неинвазивности и высокой точности и могут быть использованы для контроля параметров изделий аддитивных технологий.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения соглашения № 14.625.21.0041 от 26.09.2017 года (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI62517X0041).

ОБ АВТОРАХ

Минаев Владимир Леонидович, д. т. н.,
minaev@vniiofi.ru, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГУП «ВНИИОФИ»),
<http://www.vniiofi.ru>, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-4356-301X

Вишняков Геннадий Николаевич, д. т. н.,
ФГУП «ВНИИОФИ», <http://www.vniiofi.ru>,
Москва, Россия.
ORCID: 0000-0003-0237-4738

Иванов Алексей Дмитриевич, к. т. н.,
a.ivanov@vniiofi.ru, ФГУП «ВНИИОФИ»,
<http://www.vniiofi.ru>, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-0609-6600

Левин Геннадий Генрихович, д. т. н.,
ФГУП «ВНИИОФИ», <http://www.vniiofi.ru>,
Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-4158-5143

the methods of digital holographic interferometry and electron speckle interferometry is blurred.

For the experiment to determine the deformation, we used a schearograph shown in Figure 7 (a) and a flat plate 55×45 mm in size, on one side of which there was a cellular structure made by the additive technology method. In the cellular structure, when printing, a section of cell links with dimensions of 7×7 mm was specially omitted. This section imitated a defect of delamination of the surface from the cellular substrate. To obtain a deformed state, plate heating with hot air was used. Qualitative detection of this defect on the flat side of the plate is shown in Fig. 7.

Thus, the presented methods of structured light and schearography satisfy the requirements of non-invasiveness and high accuracy and can be used to control the parameters of products of additive technologies.

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the implementation of agreement No. 14.625.21.0041 dated 26.09.2017 (unique identifier for applied research RFMEFI62517X0041).

REFERENCES

1. Jason Geng. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. 2011; 3(2): 128–160.
2. Zhang Z. H. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012; 50:1097–1106.
3. Song Zhang. *High-Speed 3D Imaging with Digital Fringe Projection Techniques* (Optical Sciences and Applications of Light). – CRC Press; 1 edition (March 1, 2016).
4. Schars U., Jueptner W. *Digital Holography. Digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2005.

ABOUT AUTHORS

Minaev Vladimir Leonidovich, Doctor of Engineering,
minaev@vniiofi.ru, FSUE “All-Russian Research Institute of Optical Physics Measurements”,
<https://www.vniiofi.ru>, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-4356-301X

Vishnyakov Gennady Nikolaevich, Doctor of Engineering, FSUE “All-Russian Research Institute of Optical Physics Measurements”,
<https://www.vniiofi.ru>, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0003-0237-4738

Ivanov Alexey Dmitrievich, Cand. of Engineering, FSUE “All-Russian Research Institute of Optical Physics Measurements”, <https://www.vniiofi.ru>, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-0609-6600

Levin Gennady Genrikhovich, Doctor of Engineering, FSUE “All-Russian Research Institute of Optical Physics Measurements”,
<https://www.vniiofi.ru>, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-4158-5143

16-й МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ И ВЫСТАВКА

ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ –
ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

MetrolExpo'2020

Москва, 2-4 июня
ВДНХ, павильон 75



ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:



МЕТРОЛОГИЯ
METROLOGY



ИЗМЕРЕНИЯ
MEASUREMENTS



ИСПЫТАНИЯ и АНАЛИТИКА
TESTING & ANALYTICS



ДИАГНОСТИКА и КОНТРОЛЬ
DIAGNOSTICS & CONTROL



АВТОМАТИЗАЦИЯ
PROMAUTOMATICS



Устроитель:

Выставочная компания
ВЭСТСТРОЙ ЭКСПО

+7 (495) 937-40-23
metrol@expoprom.ru

ПРИГЛАШАЕМ ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ

www.metrol.expoprom.ru

