

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-10-76-82>

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА, ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

© Алексей Дмитриевич Иванов*, Владимир Леонидович Минаев, Геннадий Николаевич Вишняков

ФГУП «ВНИИОФИ», Россия, 119361, Москва, ул. Озерная, 46; *e-mail: academi@ya.ru

*Статья поступила 26 июля 2019 г. Поступила после доработки 10 августа 2019 г.
Принята к публикации 21 августа 2019 г.*

В связи с развитием аддитивного производства и применением аддитивных технологий на всех этапах жизненного цикла изделий возникает потребность в методах контроля их характеристик. В работе рассмотрено использование оптических методов измерений применительно к объектам сложной формы. Изделия, изготовленные методами аддитивных технологий, могут иметь дефекты, характерные для «послойного» выращивания деталей, такие как расслоения, непроклеи, пористость, коробление, напряженно-деформированные состояния, шероховатость и т.д. Описаны устройства, разработанные во ФГУП «ВНИИОФИ» на основе принципов интерференции, структурированного света и голографии, для выявления дефектов таких изделий. Рассмотрены преимущества и недостатки интерференционного микроскопа, сканера-профилометра и шерографа применительно к контролю указанных типов геометрических дефектов. Особенность этих приборов заключается в возможности работать с различными типами материалов: металлы и диэлектрики, прозрачные, отражающие, рассеивающие, а также композитные материалы. Приведены результаты экспериментальных исследований по обнаружению поверхностных и подповерхностных дефектов. Представлены интерферограммы и результаты реконструкции фазы как отражающих, так и прозрачных объектов. Обнаружены дефекты в показателе преломления микрорезонатора, изготовленного из оптического волокна. Оценены метрологические характеристики оптических приборов для неразрушающего контроля изделий. Изготовлены и опробованы рабочие эталоны для градуировки и калибровки оптических приборов, рассматриваемых в работе. Использование специально разработанных мер позволяет применять указанные методы не только для качественной оценки объектов сложной формы и дефектоскопии, но и для количественной оценки характеристики таких объектов.

Ключевые слова: аддитивные технологии; оптические измерения; неразрушающий контроль; интерферометрия.

NON-DESTRUCTIVE OPTICAL TESTING OF THE PRODUCTS OBTAINED USING ADDITIVE MANUFACTURING

© Alexey D. Ivanov*, Vladimir L. Minaev, Gennady N. Vishnyakov

The All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements (VNIIOFI), 46 Ozernaya ul., Moscow, 119361, Russia; *e-mail: academi@ya.ru

Received July 26, 2019. Revised August 10, 2019. Accepted August 21, 2019.

Developing of additive manufacturing and the use of additive technologies at all stages of the product life cycle entails the necessity of developing methods providing control of their characteristics. Here we consider application of the optical measurement procedures to the objects of complicated shape. Products manufactured by the methods of additive technologies may have defects such as delamination, starved joint, porosity, warp, stress-strain state, roughness, etc. We present the devices designed and developed on the principles of interference, structured light and holography at the “VNIIOFI” Federal State Unitary Enterprise to identify the defects in the products of additive technologies. The advantages and shortcomings of the interference microscope, scanner-profilometer, and shearograph are examined with regard to the control of the aforementioned types of geometric defects. The special feature of the contact-free methods is the possibility of control of different types of materials: metals and dielectrics, transparent, reflective, scattering and composite materials. The results of experimental study aimed at detection of the surface and subsurface defects are presented. Interferograms and results of phase reconstruction are presented both for reflective and transparent objects. Defects of the refractive index of the microcavity made

of an optical fiber were detected. Metrological characteristics of optical devices for non-destructive testing of products are estimated. Standards for calibration and graduation of the optical devices considered in the study were manufactured and tested. The use of specially developed standards makes it possible to use these methods both for qualitative assessment of the objects of complicated shape and flaw detection and for quantitative estimation of their characteristics.

Keywords: additive technologies; optical measurements; non-destructive testing; interferometry.

Введение

Чрезвычайно важно осуществлять контроль деталей, формируемых с использованием аддитивных технологий, на наличие дефектов. Надежность и эксплуатационные характеристики таких деталей зависят от наличия в них структурных неоднородностей и несплошностей, в связи с чем обнаружение дефектов является актуальной задачей. На рис. 1 приведены основные типы дефектов изделий, произведенных с применением аддитивных технологий, в зависимости от степени опасности (выделена цветом) [1]. Эти дефекты особенно характерны для технологии селективного лазерного спекания.

Учитывая, что использование аддитивных технологий наиболее целесообразно при изготовлении дорогих изделий сложной формы, контроль технологических процессов и диагностика конечных изделий являются одними из ключевых звеньев в широком распространении этих технологий. Несмотря на то что международные стандарты в области неразрушающего контроля аддитивных изделий все еще находятся в разработке (ISO/ASTM DTR 52905, ISO/ASTM CD TR 52906), уже сейчас с уверенностью можно сказать, что оптические методы могут быть успешно использованы в целях контроля поверхностных и подповерхностных дефектов.

Для контроля вышеуказанных дефектов во ФГУП «ВНИИОФИ» были разработаны три устройства: интерференционный микроскоп с томографической приставкой, сканер-профилометр и шерограф. Цель настоящей работы заключалась в разработке методов и средств для измерений конкретных параметров изделий аддитивного производства — геометрических параметров (в

широком диапазоне размеров изделий), деформаций и напряженных состояний, а также для определения типа и концентраций примесей микронного и субмикронного масштаба на поверхности изделий.

Методы исследования и аппаратура

Внешний вид разработанных приборов и типы контролируемых с их помощью дефектов представлены на рис. 2. Важно отметить, что в настоящий момент в аддитивном производстве используют отражающие, рассеивающие и прозрачные материалы [2]. Таким образом, данные устройства могут работать с материалами, имеющими различные оптические характеристики.

Первое устройство на рис. 2 совмещает в себе интерференционный микроскоп и оптический томограф. Интерференционная микроскопия имеет одну важную особенность: чтобы получить интерференционную картину, необходимо, чтобы объект отражал свет. В случае изделий аддитивного производства для использования указанного метода им необходима полировка. После полировки микроскоп может с высокой точностью контролировать шероховатость и наличие микротрещин.

Микроскоп может определять форму поверхности благодаря использованию в оптической схеме метода фазовых шагов [3]. Фазосдвигающий блок представляет собой узел, расположенный в референтном оптическом канале интерференционного микроскопа по схеме Линника, содержащий гладкое (моноатомное) зеркало с шероховатостью $Ra = 0,05$ нм, микрообъектив и систему микрометрического и нанометрического перемещения, управляемую ПК. Зеркало нахо-

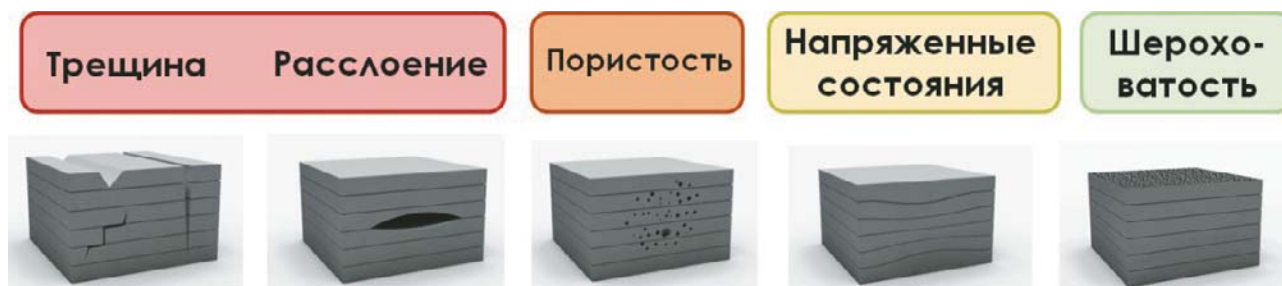


Рис. 1. Дефекты, характерные для аддитивного производства

Fig. 1. The main defects characteristic of the products of additive manufacturing

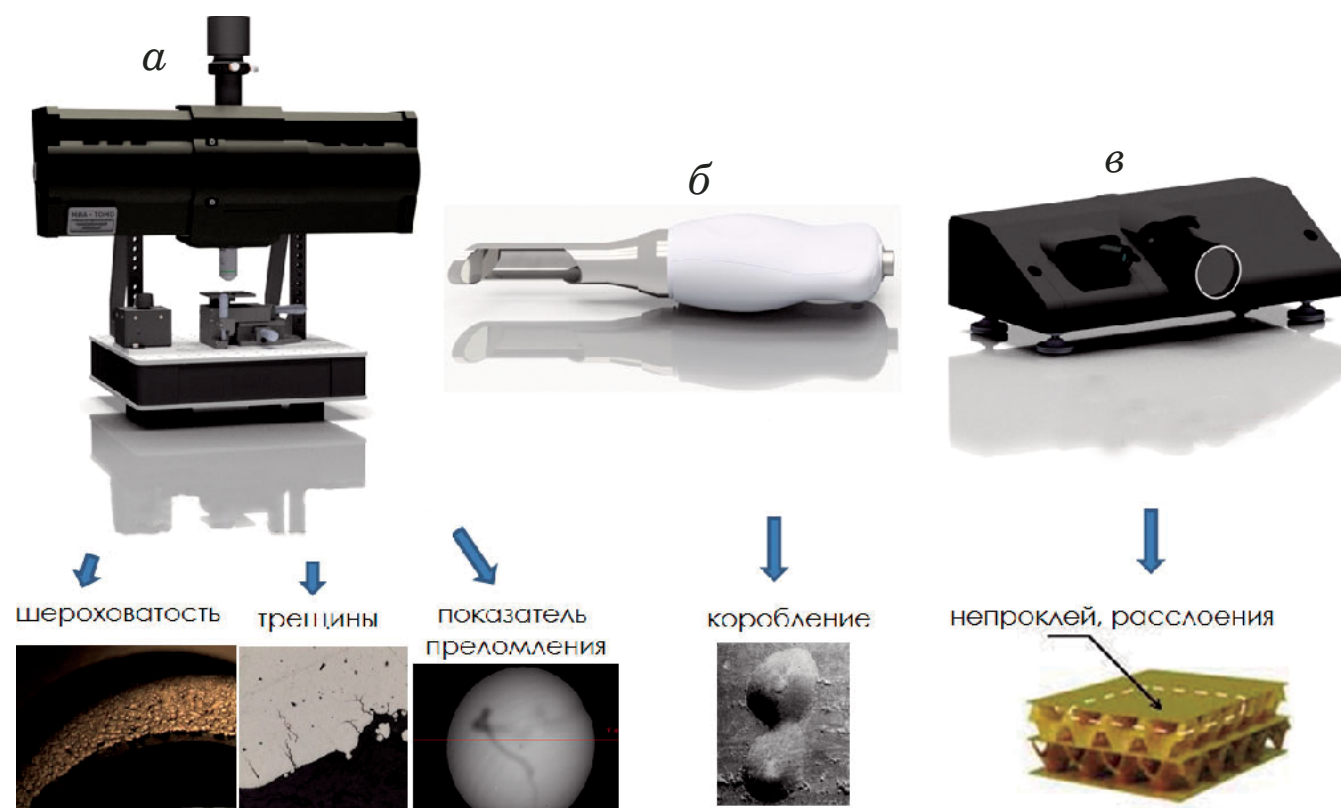


Рис. 2. Внешний вид приборов для неразрушающего контроля: *a* — интерференционный микроскоп-томограф; *б* — сканер-профилометр; *в* — шерограф

Fig. 2. Devices for non-destructive testing: *a* — interference microscope – tomograph; *b* — scanner – profilometer; *c* — shearograph

дится в передней фокальной плоскости микрообъектива. Для компенсации aberrаций оптической системы интерферометра перед проведением измерения записывают профиль эталонного гладкого зеркала, который в дальнейшем вычитают из полученных данных.

При проектировании микроскопа основная задача состояла в повышении точности и стабильности определения высоты микрорельефа, а также расширении диапазона измерений в латеральной плоскости. В конструкции интерферометра был использован точечный источник света, который позволяет обеспечить высокую степень пространственной когерентности излучения, но при этом степень временной когерентности остается низкой, поскольку спектр подобных источников достаточно широкий. В результате данное решение позволяет удалить спекл-структуры из интерферограмм, что, в свою очередь, снижает количество фазовых шумов.

На рис. 3 показано, как посредством обработки интерференционных картин реконструируют форму объекта (вмятина), а также представлены результаты измерений распределения показателя преломления прозрачной микросферы (микрорезонатора) из стекла диаметром около 400 мкм.

Микрорезонатор — уникальный элемент фотоники, который работает с модами типа «шепчущей галереи». Важнейшей характеристикой такого резонатора является его добротность, которая в значительной степени определяется рассеянием мод оптического излучения на различных дефектах. Рассеяние оптического излучения происходит на любых локальных неоднородностях показателя преломления. При этом важно определять не только расположение его флуктуаций, но и их абсолютное значение, для чего необходимо провести измерения локальных микроскопических неоднородностей показателя преломления по всему объему микрорезонатора. Такие неоднородности невозможно зарегистрировать стандартными методами оптической или зондовой микроскопии, поэтому для этих целей мы выбрали метод оптической томографии [4].

При конструировании микроскопа были использованы серийно выпускаемые оптические, оптомеханические и прочие комплектующие производства Thorlabs Inc. (США) и Edmund Optics (Германия). Выбор данных производителей обусловлен широкой номенклатурой и высоким качеством изготовления выпускаемых ими комплектующих.

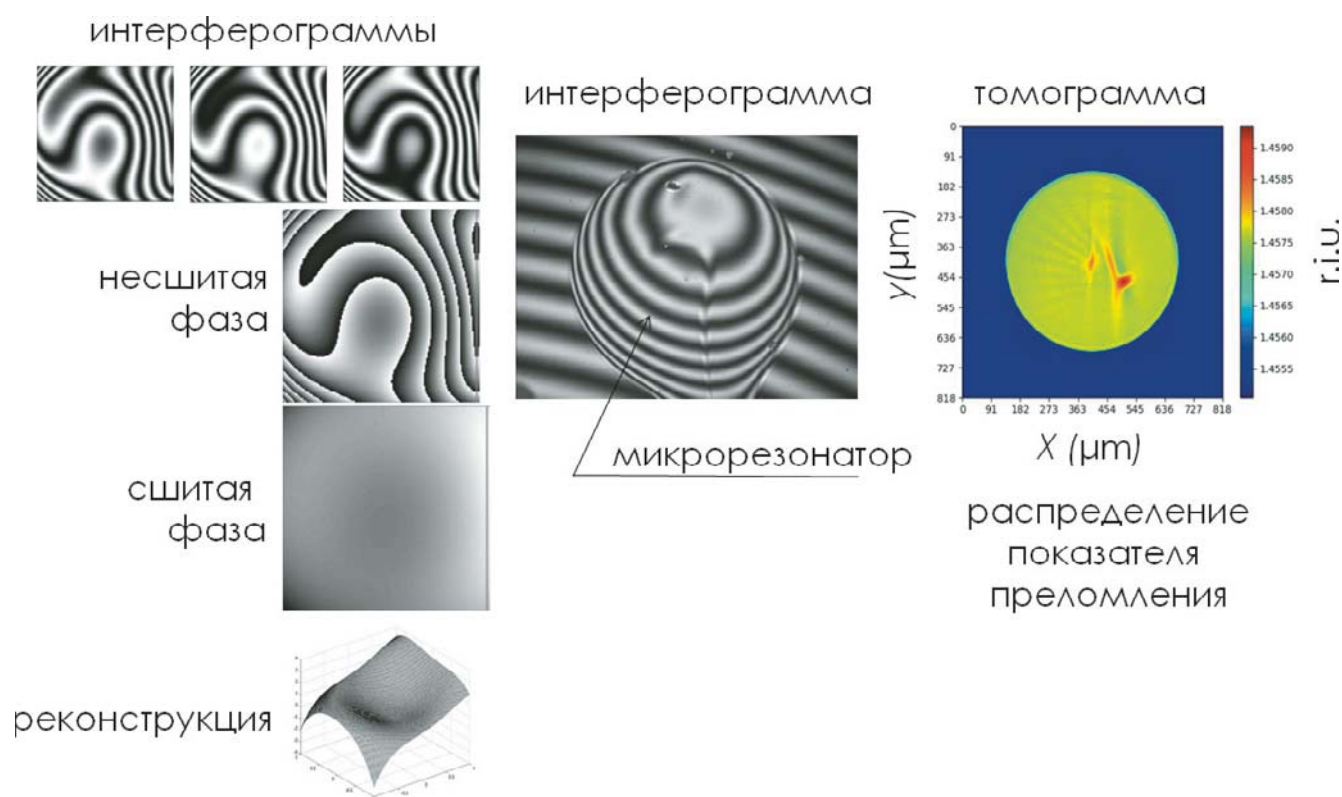


Рис. 3. Поэтапная обработка интерферограмм отражающей поверхности объекта для его 3D-реконструкции (слева) и томограмма прозрачного оптического микрорезонатора (справа)

Fig. 3. Step-by-step processing of interferograms of reflecting surface for 3D-reconstruction of the object (left) and tomogram of a transparent optical microresonator (right)

Микроскоп обладает следующими техническими и метрологическими характеристиками: габаритные размеры не превышают 360 (длина) $\times$ 300 (ширина) $\times$ 495 (высота) мм; диапазон измерений высот — от 10^{-8} до $5 \cdot 10^{-5}$ м; приведенная относительная погрешность измерений — 0,01 %.

Следующий прибор — сканер-профилометр — использует в своей работе структурированный свет, который представляет собой систему проецируемых параллельных черных и белых полос. Сканер определяет форму объектов, имеющих диффузно-рассеивающую поверхность: о форме объекта судят по деформации полос при его освещении структурированным светом. Восстановление фазы для профилометра, где используется структурированный свет, проводят теми же методами, что и в интерферометрии: методами фазовых шагов и фурье-преобразования (FTP — Fourier Transform Profilometry) [5]. В методе фазовых шагов требуется регистрация как минимум трех интерференционных изображений объекта при различных значениях сдвига полос, поэтому его использование для исследования динамических объектов проблематично. Для метода фурье-преобразования достаточно одного изображения, поэтому его широко применяют

при изучении нестационарных объектов. Метод фурье-профилометрии обладает очевидным преимуществом при регистрации данных в реальном времени и 3D-измерениях динамических процессов. Основные этапы обработки полученных изображений методом фурье-преобразования включают:

прямое преобразование Фурье интерферограммы объекта: так как изображение объекта промодулировано системой полос, его пространственный спектр будет иметь ярко выраженные пики (порядки) вблизи частот, кратных частоте полос;

пространственную фильтрацию спектра объекта полосовым фильтром, выделяющим только +1-й или -1-й порядок в спектре;

обратное преобразование Фурье, в результате которого получают матрицу комплексных чисел, аргументы которых равны искомой фазе.

Для реконструкции формы поверхности объекта методом фурье-синтеза использовали много-ракурсную оптическую схему проекции полос, геометрические параметры которой обеспечивают одинаковые масштабные преобразования фазы в высоту объекта в каждом из ракурсов. На рис. 4 представлена трехракурсная система освещения объекта.

оптическая схема проецирования полос

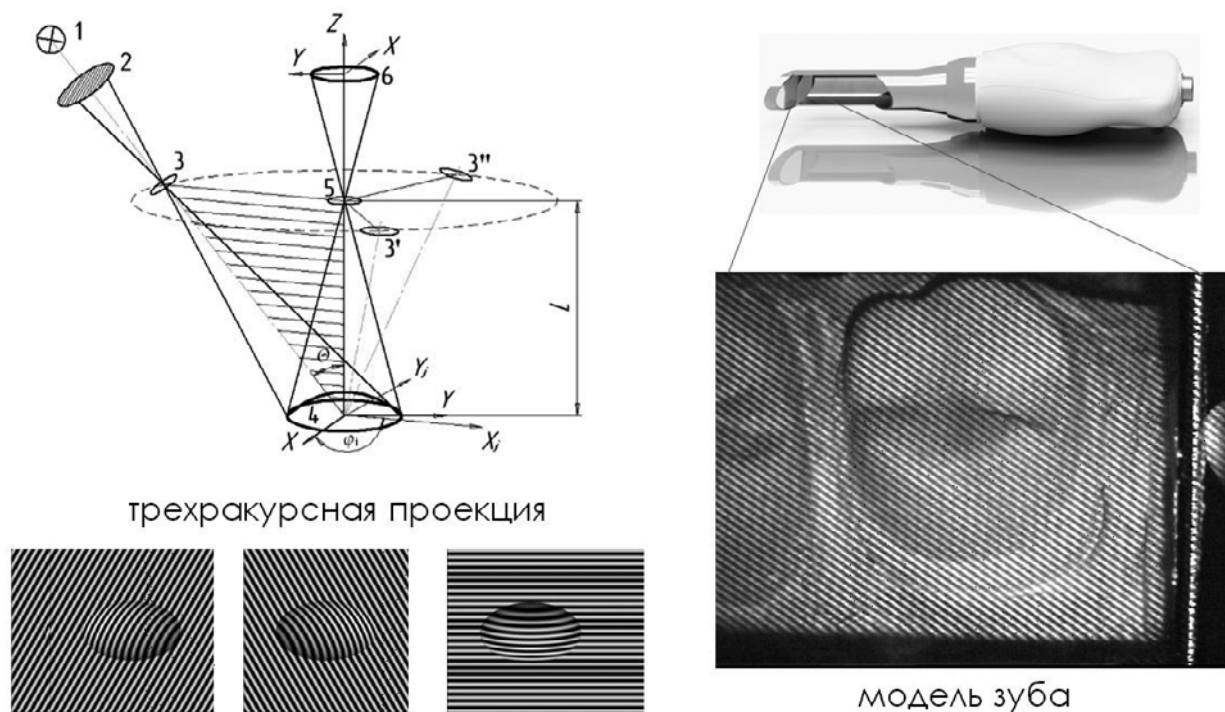


Рис. 4. Схема работы сканера-профилометра (слева): 1 — источник света; 2 — решетка; 3, 3', 3'' — объективы проецирующих каналов; 4 — объект измерения; 5 — объектив регистрирующего канала; 6 — плоскость регистратора; модель зуба в структурированном свете (справа)

Fig. 4. The optical scheme of the scanner-profilometer (left): 1 — light source; 2 — diffraction grating; 3, 3', 3'' — lenses of projection channels; 4 — object under study; 5 — lens of the registration channel; 6 — plane of detector; model of the tooth in structured light (right)

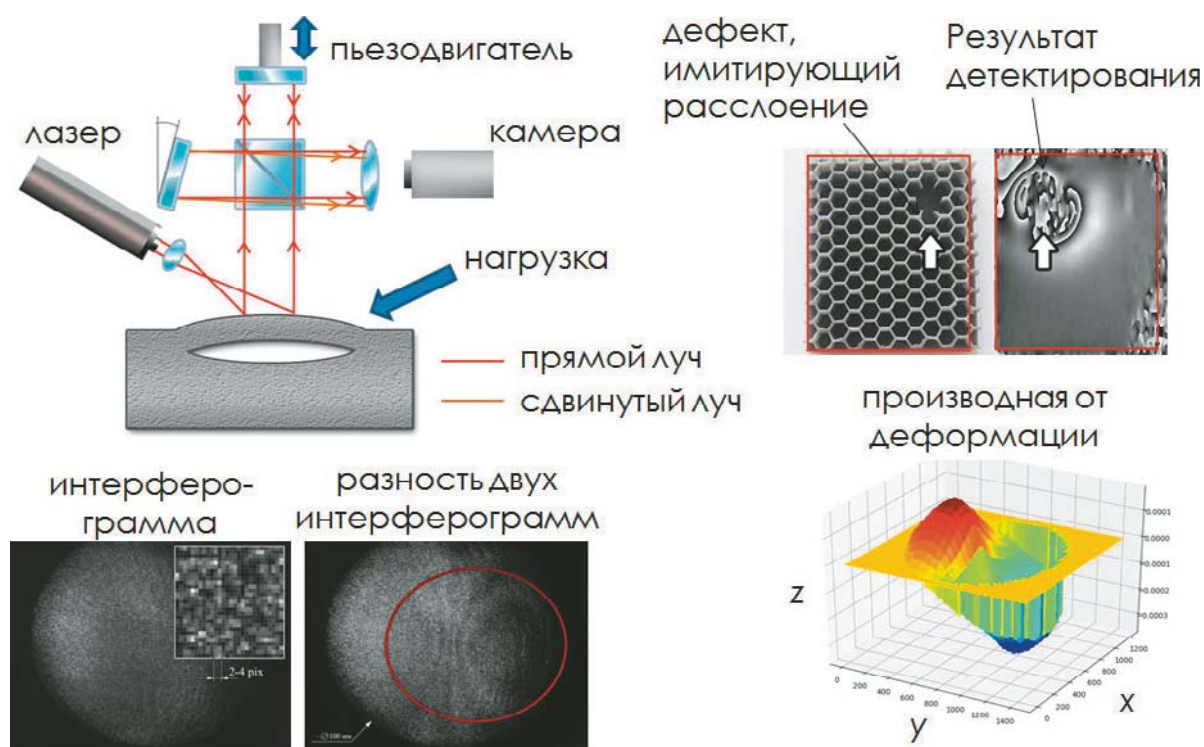


Рис. 5. Схема работы шерографа и исходные интерферограммы (слева); обнаружение дефекта при деформации изделия (справа)

Fig. 5. The optical scheme of the shearograph and interferograms: initial (left); and corresponding to strain-induced product flaw (right)



Рис. 6. Мера деформации и шерограмма (слева); меры для сканера-профилометра и результаты его калибровки (справа)
Fig. 6. The loading device and the shearogram (left); cones for imitation of the surface shape and results of calibration (right)

Конструкция профилометра позволяет использовать его в стоматологии. Важно отметить, что аддитивные технологии применяют в современной стоматологии для создания хирургических шаблонов, элайнеров, брекет-систем, протезов и коронок.

Основные технические и метрологические характеристики сканера-профилометра: диапазон измерений высот — от $5 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-2} м; приведенная относительная погрешность измерений — 0,5 %; габаритные размеры — не более $235 \times 53 \times 50$ мм.

Третий прибор — шерограф — основан на методах спекл-интерферометрии, позволяющих получить производную поля деформации поверхности объектов. Шерография является интерференционным методом исследования деформаций шероховатых поверхностей и находит применение в авиационной и космической отраслях для поиска подповерхностных дефектов. Схема разработанного шерографа приведена на рис. 5. Оптическая система прибора формирует два поперечно сдвинутых пучка, каждый из которых создает изображение объекта в плоскости матрицы видеокамеры. Эти пучки параллельно интерферируют и выстраивают интерференционную картину — спекл-интерферограмму.

Основное применение шерографии — контроль подповерхностных дефектов композитных материалов [6]. Чтобы обнаружить дефект, необходимо нагрузить объект и сделать несколько экспозиций его поверхности: до и после деформации. Для расшифровки интерферограмм используют метод фазовых шагов. Для регистрации деформаций объект измерений должен находиться на расстоянии порядка 4000 ± 1000 мм от шерографа, при этом объект измерений освещается лазером. В данной работе использовали лазерный источник излучения с длиной волны 532 нм и мощностью порядка 15 мВт.

Пример работы устройства приведен на рис. 5, иллюстрирующем обнаружение дефекта с плоской стороны пластины размерами $55 \times$

$\times 45$ мм, одна сторона которой имела ячеистую структуру, изготовленную методом аддитивных технологий на 3D-принтере FormLabs. Для получения деформированного состояния пластины ее нагревали горячим воздухом. При нагревании пластины деформация ее лицевой стороны позволяла обнаружить локализацию и определить размер дефекта.

Шерограф обладает следующими техническими и метрологическими характеристиками: габаритные размеры не превышают $310 \times 150 \times 100$ мм; диапазон измерений деформаций — от 1 до 100 мкм; погрешность измерений перемещений — не более $\pm 0,5$ мкм для объектов с параметрами шероховатости $Rz = 3 - 20$ мкм, $Ra = 0,5 - 3,0$ мкм.

Для определения метрологических характеристик сканера-профилометра и шерографа были разработаны меры, воспроизводящие поверхность изделий сложной формы, а также поле деформаций изделий. Внешний вид мер и результаты калибровки приборов приведены на рис. 6. Мера деформации (нагрузочное устройство) представляет собой продавливаемую мембрану, а меры формы поверхности — конусы со ступенями.

Заключение

Результаты калибровки показали, что порог чувствительности шерографа составляет 0,15 мкм, а диапазон измерений деформации — 8 мкм на одну экспозицию. Сканер-профилометр продемонстрировал отклонение формы измеряемой поверхности (СКО), равное 45 мкм. Интерференционный микроскоп показал высокую точность определения высоты до $\pm 1,5$ нм по оси z и $\pm 0,4$ мкм в латеральной плоскости. Указанные характеристики приборов позволяют обнаруживать дефекты различных типов и измерять их параметры. Таким образом, эти устройства могут быть интегрированы в процесс аддитивного про-

изводства и использованы для бесконтактного контроля качества изделий.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.625.21.0041 от 26.09.17 (уникальный идентификатор RFMEFI62517X0041).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин Н. П., Мурашов В. В., Евгенов А. Г. и др. Классификация дефектов металлических материалов, синтезированных методом селективного лазерного сплавления, и возможности методов неразрушающего контроля для их обнаружения / Дефектоскопия. 2016. № 1. С. 48 – 55.
2. Klein J., Stern M., Franchin G., et al. Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass / 3D Printing and Additive Manufacturing. 2015. Vol. 2. N 3. P. 92 – 105.
3. Vishnyakov G., Levin G., Minaev V., Nekrasov N. Advanced method of phase shift measurement from variances of interferogram / Appl. Opt. 2015. Vol. 54. N 15. P. 4797 – 4804.
4. Левин Г. Г., Минаев В. Л., Миньков К. Н. и др. Исследование внутренней структуры микрорезонаторов методом оптической томографии / Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126. № 3. С. 305 – 310.
5. Zhang Z. H. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques / Opt. Lasers Eng. 2012. Vol. 50. N 8. P. 1097 – 1106.
6. Xie X., Xu N., Sun J., et al. Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography / Opt. Commun. 2013. Vol. 286. P. 277 – 281.

REFERENCES

1. Aleshin N. P., Murashov V. V., Evgenov A. G., et al. The classification of flaws of metal materials synthesized by the selective laser melting method and the capabilities of nondestructive testing methods for their detection / Russ. J. nondestruct. Test. 2016. Vol. 52. N 1. P. 38 – 43.
2. Klein J., Stern M., Franchin G., et al. Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass / 3D Printing and Additive Manufacturing. 2015. Vol. 2. N 3. P. 92 – 105.
3. Vishnyakov G., Levin G., Minaev V., Nekrasov N. Advanced method of phase shift measurement from variances of interferogram / Appl. Opt. 2015. Vol. 54. N 15. P. 4797 – 4804.
4. Levin G. G., Minaev V. L., Min'kov K. N., et al. Studying the Internal Structure of Microcavities by Means of Optical Tomography / Opt. Spectrosc. 2019. Vol. 129. N 3. P. 226 – 231.
5. Zhang Z. H. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques / Opt. Lasers Eng. 2012. Vol. 50. N 8. P. 1097 – 1106.
6. Xie X., Xu N., Sun J., et al. Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography / Opt. Commun. 2013. Vol. 286. P. 277 – 281.