

ШЕРОГРАФ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОСРЕДСТВОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2019 г. А. Д. Иванов^{a,*}, В. Л. Минаев^a, Г. Н. Вишняков^a

^a ВНИИ оптико-физических измерений
Россия, 119361, Москва, ул. Озерная, 46

*e-mail: Academi@ya.ru

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.

После доработки 09.07.2019 г.

Принята к публикации 09.07.2019 г.

Представлены результаты измерений деформации изделий, изготовленных методами аддитивных технологий. Показан процесс поиска и определения подповерхностных дефектов расслоения и несплошности бесконтактным оптическим методом, основанным на шерографии. Указанный метод работает на принципах интерферометрии и голографии. С его помощью можно регистрировать малейшие перемещения поверхности с точностью порядка длины волны света. Для настройки шерографа использовано градуировочное устройство, воспроизводящее деформацию поверхности. Результаты экспериментальных исследований показывают высокую чувствительность к малым деформациям изделий, составляющим около 0.2 мкм.

DOI: 10.1134/S003281621906020X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко развиваются аддитивные технологии и аддитивное производство, особенно в таких областях, как авиакосмическая отрасль и машиностроение. Важной особенностью такого производства является выращивание деталей по слоям. При этом, как правило, изделие может иметь достаточно сложную форму как снаружи, так и внутри объема детали. Современные 3D-принтеры используют в качестве материалов пластики, металлы и даже стекло [1]. Надежность и эксплуатационные характеристики деталей, полученных с использованием аддитивного производства, зависят от наличия в них структурных неоднородностей и несплошностей. По этой причине контроль таких дефектов имеет очень важное значение, а проблемы, связанные с поиском дефектов, — большую актуальность [2].

До недавнего времени детали, изготовленные таким способом, имели довольно небольшие линейные размеры по сравнению с традиционными способами производства. Устоявшимися методами неразрушающего контроля были ультразвуковая дефектоскопия [3] и метод вихревых токов [4]. Однако с появлением 3D-принтеров больших размеров, которые используют для печати материалы различных типов и с различными свойствами, увеличились размеры производимых ими деталей. В таких случаях становятся целесообразными другие методы неразрушающего контроля,

которые могут быть эффективнее и производительнее традиционных, используемых для поиска дефектов изделий.

Одним из современных оптических методов неразрушающего контроля является шерография [5]. Этот метод применяется в авиационной и космической отраслях для поиска подповерхностных дефектов — несплошностей, находящихся у поверхности изделия, но не выходящих за ее пределы. Шерография является интерференционным методом контроля, который применим к исследованию деформаций шероховатых поверхностей. Как правило, поверхность изделий, выполненных посредством аддитивного производства, имеет большую шероховатость. Для повышения эксплуатационных характеристик и уменьшения массы нередко внутри изделия используют ячеистую структуру сложной формы (наполнитель). Также зачастую оболочка детали (обшивка) может быть напечатана в режиме, отличающемся от основного, или выполнена из другого материала. В результате детали могут иметь достаточно специфические дефекты, характерные для послойной печати [6], такие как расслоения, несплошности или непрочности, которые можно успешно находить указанным бесконтактным способом.

Ярким примером технологии аддитивного производства является технология селективного лазерного сплавления (SLM). Быстрое затверждение в условиях направленного отвода тепла

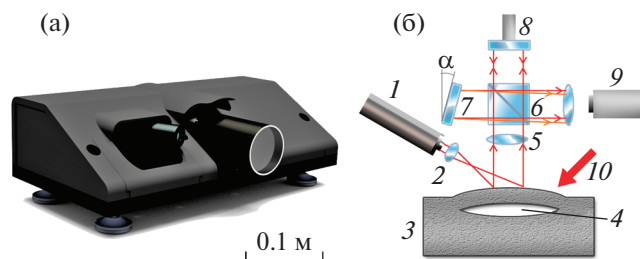


Рис. 1. Внешний вид (а) и оптическая схема (б) шерографа. 1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – объект измерений; 4 – внутренний дефект; 5 – объектив; 6 – делитель пучка; 7 – отклоняемое зеркало; 8 – зеркало с линейной подачей; 9 – камера; 10 – система деформации.

определяет микроструктуру материала, от которой зависит кристаллическая структура, форма и направление роста зерен, а также характер дефектов и шероховатость. При этом для большинства типов 3D-печати характерна различная в вертикальном и горизонтальном направлениях шероховатость поверхности выращенных деталей, что связано с послойным производством.

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 контроля подповерхностных дефектов могут быть использованы как для качественной, так и для количественной оценки характеристик дефектов. Примером тому может служить ГОСТ Р 56795-2015 «Композиты полимерные. Шерография полимерных композитов, материалов внутреннего слоя «сэндвич»-конструкций и изготовленных намоткой сосудов, работающих под давлением», введенный в действие в России в 2017 г. Стандарт устанавливает процедуру неразрушающего контроля методом шерографии однослойных и многослойных микроформных или волокнистых полимерных композитов, сотовых или пенных материалов внутреннего слоя «сэндвич»-конструкций.

В данной статье описаны шерограф и устройство для его настройки и градуировки. Метод опробован для изделий, выполненных с помощью аддитивного производства. Определены границы чувствительности прибора.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Шерография также известна под названием сдвиговая электронная спекл-интерферометрия. Она занимает особое место в оптической дефектоскопии. При помощи этого метода исследуют поверхность материалов, которую последовательно подвергают нагрузке для выявления внутренних

дефектов посредством измерения поля деформаций, что позволяет находить такие распространенные дефекты в материалах, как отслоения. Объект измерений в шерографии освещается широким лазерным пучком, а интерференционная картина снимается с помощью видеокамеры. При отражении когерентного света от шероховатой поверхности на изображении камеры наблюдается зернистая спекл-структура. В оптической схеме шерографа формируются два поперечно-сдвинутых изображения, которые интерферируют между собой. Для получения информации о поле деформации необходимо провести два измерения объекта: в ненагруженном и нагруженном состояниях. Для нагрузки объекта в составе установки используются устройства для создания возмущения посредством пониженного давления (вакуума), теплового или акустического воздействия. Чтобы получить поле деформации, необходимо провести ряд программных обработок спекл-интерферограмм и процедур фильтрации, а также использовать специальное устройство для градуировки шерографа.

Преимущество метода контроля, описываемого в работе, состоит в следующем. В первую очередь, это бесконтактные измерения по всей площади поверхности детали. Угол обзора камеры и угол освещения обеспечивают съемку габаритных деталей размерами до 2×2 м. Измерения можно проводить в режиме реального времени. Время обработки одной интерферограммы занимает несколько секунд. Метод работает с любыми материалами (металлами и диэлектриками), имеющими диффузно рассеивающую поверхность. Шерография обладает широкими возможностями для автоматизации измерений: камеру можно установить на роботизированную «руку» и проводить инспекционный контроль на конвейере.

Оптическая схема шерографа показана на рис. 1а. Внешний вид разработанного во ФГУП «ВНИИОФИ» шерографа [7, 8] приведен на рис. 1б.

Лазер 1 с длиной волны излучения 532 нм освещает объект измерений 3, содержащий внутренний дефект 4. Пучок света от лазера расширяется при помощи линзы 2. Свет, отраженный и рассеянный объектом измерения, попадает на светоделитель 6 через объектив 5. Чувствительность шерографа к деформации будет зависеть от величины сдвига изображения, создаваемого сдвиговой оптикой в составе оптической схемы [9]. Для обеспечения сдвига изображения в установке используется зеркало 7, закрепленное на поворотном держателе, который поворачивается на небольшой угол ($\alpha = \pm 5^\circ$) (рис. 1а). При этом вектор сдвига изображения можно регулировать в двух направлениях. Для нагружения и деформации объекта измерений используется струя горячего воздуха 10.

Для восстановления разности оптического хода лучей применяется метод фазовых шагов [10], позволяющий получить фазовое изображение объекта измерений. Для реализации метода зеркало 8 дискретно перемещается посредством пьезоактюатора на расстояние, кратное $\lambda/4$. В плоскости матрицы видеокамеры 9 образуется сведенное изображение, которое представляет собой исходную интерферограмму (спекл-структуру). Спекл-структура – это результат интерференции когерентного источника света от диффузно отражающей поверхности объекта измерений. Она представляет собой зернистую структуру, в которой интенсивность каждого пятна на изображении будет изменяться при изменении формы объекта.

Для получения фазового изображения использовалось 5 фазовых шагов. Таким образом, для одной экспозиции необходимо получить пять спекл-интерферограмм. Одно из преимуществ такой реконструкции фазы по сравнению с пространственными методами является меньшее количество шумов и высокая точность реконструкции фазы.

Важной особенностью метода является возможность автоматической обработки изображений. Программное обеспечение, разработанное для фильтрации спекл-интерферограмм, функционирует по следующему алгоритму.

На первом этапе получают пять сдвиговых спекл-интерферограмм, по которым реконструируют фазовое изображение (несшитая фаза) в исходном (ненагруженном) состоянии. Затем получают пять сдвиговых спекл-интерферограмм в нагруженном состоянии. Исходная спекл-интерферограмма объекта измерений показана на рис. 2. В качестве объекта измерений использовалась мембрана диаметром 100 мм из дюралюминиевого сплава. Размер спеклов на цифровом изображении составлял от двух до четырех пикселей.

На втором этапе обработки осуществляется вычитание фазовых изображений в нагруженном и исходном состояниях. На данном этапе фазовое изображение, как правило, сильно зашумлено. Это затрудняет поиск на изображении мест локализации дефектов, а также препятствует использованию алгоритмов “сшивки” для количественного определения фазового сдвига. Поэтому перед “сшивкой” необходимо снижать уровень шумов на “несшитом” фазовом распределении. Для этого используется синус-косинусная фильтрация в комбинации с усредняющим фильтром [9]. Для получения хорошего результата процедура фильтрации носит итерационный характер с числом повторений около 20–30. Таким образом, синус-косинусная фильтрация (30 итераций) является третьим этапом обработки изображения.

После трех этапов обработки получается шерограмма, представляющая собой изображение

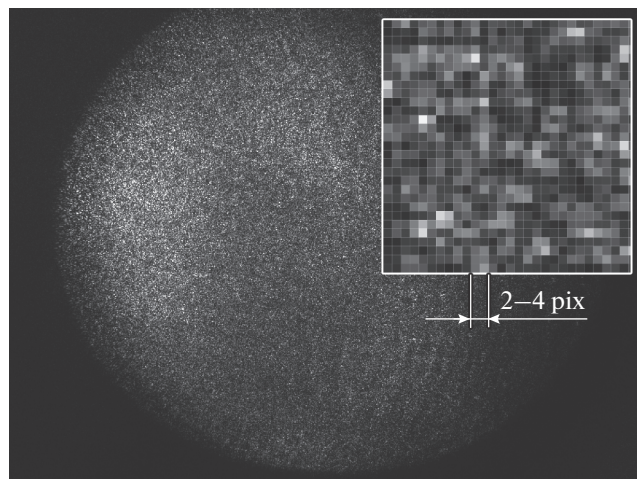


Рис. 2. Исходная интерферограмма. На врезке представлено увеличенное изображение спекл-структуры.

несшитой фазы производной от деформации. Такое изображение наиболее наглядно демонстрирует локализацию подповерхностных дефектов. При нагрузке объекта и перемещении его поверхности в направлении главной оптической оси на шерограмме будет наблюдаться характерная картина “разрывов фазы”.

Заключительным этапом обработки изображений может быть сшивка фазы для получения производной от деформации [11].

Для проверки работоспособности шерографа был проведен эксперимент с тест-объектом, изготовленным методом аддитивной печати на 3D-принтере Formlabs Form 2. Тест-объект изготовлен из фотополимерной смолы Formlabs Grey Resin, отвержденной ультрафиолетовым излучением в процессе ее выращивания. На рис. 3 (справа) приведена шерограмма тест-объекта, который представляет собой плоскую пластину размером 55×45 мм с ячеистой структурой с одной стороны (рис. 3, слева). В ячеистой структуре при печати специально пропущен участок звеньев ячеек размером 7×7 мм. Этот участок имитировал дефект отслоения поверхности толщиной 1 мм от ячеистой подложки. Использованный тест-объект был деформирован путем нагрева струей горячего воздуха. В результате локализация подповерхностного дефекта была обнаружена с плоской стороны пластины. На приведенной на рис. 3 (справа) шерограмме видна область с разрывами фазы. Таким образом, устройство опробовано на объектах, выполненных методами аддитивного производства.

Для калибровки шерографа было разработано специальное градуировочное устройство, позволяющее воспроизводить деформацию объекта. Внешний вид устройства приведен на рис. 4б. Градуировочное устройство представляет собой

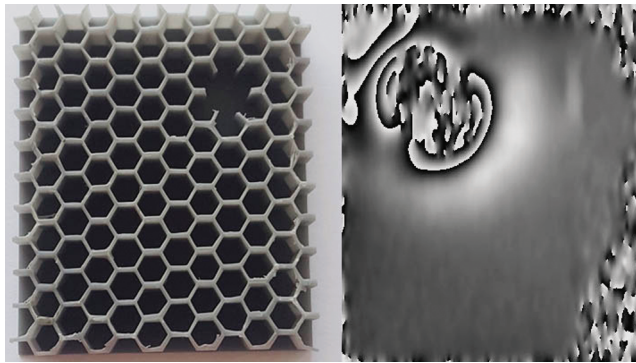


Рис. 3. Слева – тестовый образец изделия сложной формы, изготовленный методом 3D-печати с имитацией дефекта отслоения поверхности от ячеистой структуры (пропущен участок структуры размером 7×7 мм); справа – шерограмма, демонстрирующая результат определения дефекта со стороны оболочки.

деформируемую сменную мембрану *1*, закрепленную в стальном корпусе *2*. Нагрузка на мембрану передается толкателем посредством дифференциального микрометрического винта *4* через рычаг *3* с передаточным соотношением 5:1. Контроль перемещения толкателя осуществляется индикатором *5* часового типа, закрепленным на оси перемещения толкателя. Для калибровки необходима возможность заменять мембраны, которые обладают различными свойствами поверхности. Для обеспечения этого требования в конструкции устройства имеется массивная съемная шайба, а также пазы и штифты для центровки мембран и последующей их установки в корпус. Сменные мембраны могут имитировать характеристики реального объекта измерений. В качестве таких характеристик были выбраны шероховатость и твердость.

С помощью градуировочного устройства была выполнена настройка шерографа, определены углы смещения сдвиговой оптики для регистрации конкретных значений деформации объектов. На рис. 4а приведены шерограммы при различной деформации мембраны, выполненной из дюралюминиевого сплава толщиной 4 мм. При этом относительный сдвиг изображения в шерографе был установлен равным 8 мм.

Диапазон воспроизведения деформации такого нагрузочного устройства составляет 120 мкм. Данный предел обусловлен предельной нагрузкой на дифференциальный винт, которая равна примерно 3–5 кг. Контроль перемещения толкателя осуществлялся с погрешностью ± 0.5 мкм.

Само нагрузочное устройство обладает нелинейной передаточной характеристикой вследствие деформации рычага и толкателя. Поэтому перемещение внешней поверхности мембраны, которая используется для оптического контроля

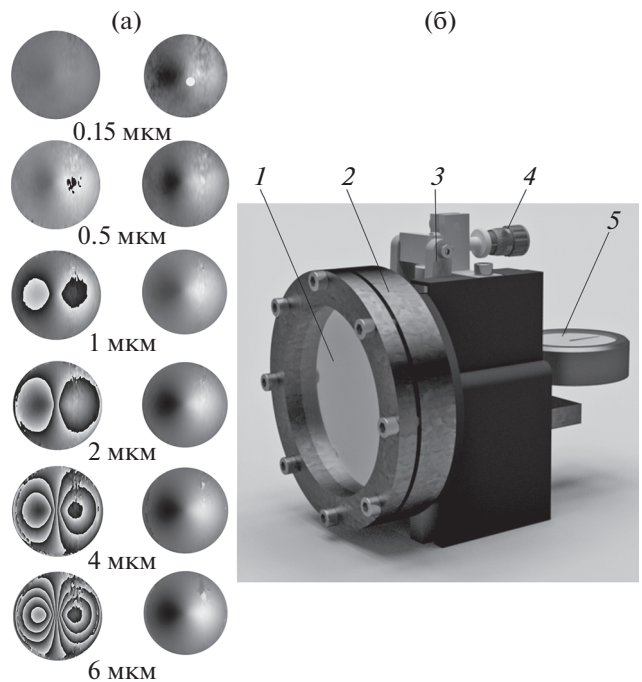


Рис. 4. а – несшитая фаза (слева) и сшитая фаза (справа) производной от деформации; б – градуировочное устройство: *1* – мембрана, *2* – корпус, *3* – рычаг, *4* – микрометрическая подача, *5* – индикаторная головка.

методом шерографии, также было градуировано при помощи дополнительной измерительной индукционной головки с цифровым отсчетом (цена деления 0.05 мкм) и погрешностью ± 0.3 мкм. Результаты калибровки градуировочного устройства в центральной точке мембраны приведены на рис. 5. По оси *x* отложены показания индикатора часового типа в составе нагрузочного устройства, а по оси *y* – показания контрольного индикатора, снимаемые непосредственно с поверхности мембраны. Нелинейность на начальном участке составляет единицы микрометров, а общая нелинейность во всем диапазоне воспроизведения деформации не превышает 6 мкм. Линия аппроксимации экспериментальных данных показывает наклон графика, отличный от 45° , что объясняется сжатием материала конструкции устройства.

Анализ чувствительности шерографа к линейным деформациям, проведенный на основе шерограмм, представленных на рис. 4, показал высокую чувствительность данного оптического устройства. Шерограммы были получены при деформации мембраны механическим методом. По показаниям индикатора в составе градуировочного устройства можно сделать вывод, что порог чувствительности шерографа находится ниже 0.2 мкм.

Высокая чувствительность шерографа имеет важное значение для определения дефектов, на-

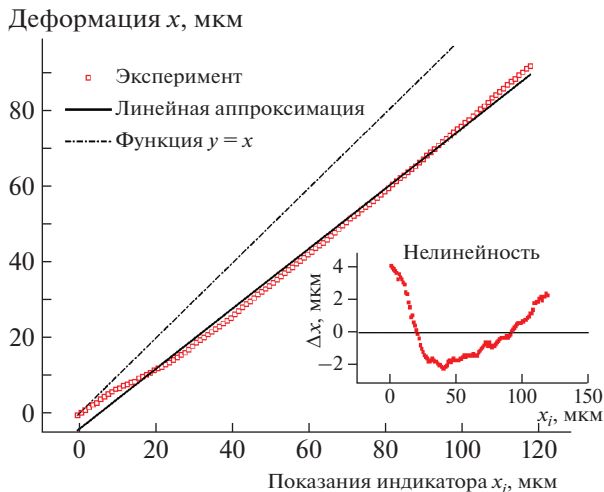


Рис. 5. Результаты эксперимента по определению передаточной характеристики и нелинейности (на вставке) градуировочного устройства.

ходящихся на значительной глубине от поверхности, когда линейный размер дефекта меньше, чем расстояние от него до поверхности детали. Система нагружения изделий в шерографии позволяет деформировать поверхность на величины порядка микрометра, и в зависимости от типа воздействия будут важны такие характеристики контролируемой детали, как тепловое расширение и твердость материала. В некоторых случаях задача равномерного и достаточного нагружения больших деталей может быть сопряжена с рядом трудностей. По этой причине важна правильная юстировка сдвиговой оптики шерографа при помощи градуировочного устройства для поиска подповерхностных дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный шерограф позволяет измерять перемещения поверхности объекта с интерферометрической чувствительностью, при этом не требуется серьезных мер по устранению вибрации в помещении, где осуществляется контроль. Разработанное градуировочное устройство позволяет провести настройку сдвиговой оптики камеры шерографа и определить его чувствительность. Экспериментальные результаты определения напряженно-деформированных состояний изделий от механических и тепловых воздействий

показали, что можно с высокой надежностью обнаруживать наличие объемных внутренних дефектов внутри материала.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klei J., Stern M., Franchin G., Kayser M., Inamura C., Dve S., Weaver J.C., Houk P., Colombo P., Yang M., Oxman N. // 3D Printing and Additive Manufacturing. 2015. V. 2. № 3. P. 92. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0021>
2. Каблов Е.Н. // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7.
3. Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М.: Наука, 2009.
4. Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихре-токовый контроль: учеб. пособие / Под общ. ред. В.В. Ключева. М.: Спектр, 2011.
5. Steinchen W., Yang L. Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry. USA. SPIE Press, 2003.
6. Алёшин Н.П., Мурашов В.В., Евгенов А.Г., Григорьев М.В., Щипаков Н.А., Василенко С.А., Краснов И.С. // Дефектоскопия. 2016. № 1. С. 48.
7. Иванов А.Д., Минаев В.Л., Вишняков Г.Н., Левин Г.Г. // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и антикоррозионной защиты легких сплавов" (Москва, 12 апреля 2019) [Электронный ресурс] / М.: ВИАМ, 2019. С. 74.
8. Иванов А.Д., Минаев В.Л., Вишняков Г.Н. // Сб. трудов "Лучший молодой метролог КОOMET-2019". Казань: 5–6 июня 2019. С. 26.
9. Waldner S.P. Quantitative Strain Analysis With Image Shearing Speckle Pattern Interferometry // In book "Interferometry In Speckle Light: Theory And Applications" / phd thesis 2000. p. 144. https://doi.org/10.1007/978-3-642-57323-1_40
10. Vishnyakov G., Levin G., Minaev V., Nekrasov N. // Applied Optics. 2015. V. 54. № 15. P. 4797. <https://doi.org/10.1364/AO.54.004797>
11. Herráez M.A., Burton D.R., Lalor M.J., Gdeisat M.A // Applied Optics. 2002. V. 41. № 35. P. 7437. <https://doi.org/10.1364/AO.41.007437>