



Аппаратура для диагностики параметров изделий аддитивных технологий

Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев, А. Д. Иванов
ФГУП «ВНИИ Опτικο-физических измерений», minaev@vniiofi.ru, Москва, Россия

В статье представлен комплекс аппаратуры, разработанный для диагностики параметров изделий, выполненных с помощью аддитивных технологий. Комплекс включает в себя интерференционный микроскоп, 3D-камеру, 3D-сканер и электронный спекл-интерферометр, а также метрологическое обеспечение к этим приборам в виде мер и методик измерений. Преимущество разработанного решения состоит в возможности имитации деформации поверхности с различными физическими свойствами и характеристиками.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение изделий, выполненных методами аддитивных технологий, спекл-интерферометр, калибровка 3D-камеры и 3D-сканера

Статья получена: 16.07.2019. Принята к публикации: 04.09.2019.

Equipment for Diagnostics of Parameters of Additive Technology Products

G. N. Vishnyakov, G. G. Levin, V. L. Minaev, A. D. Ivanov
FSUE VNI Optical Physics Measurements, minaev@vniiofi.ru, Moscow, Russia

The article presents a set of equipment designed to diagnose product parameters made using additive technologies. The complex includes an interference microscope, a 3D camera, a 3D scanner and an electronic speckle interferometer, as well as metrological support for these devices in the form of measures and measurement procedures. The advantage of the developed solution is the ability to simulate surface deformation with various physical properties and characteristics.

Key words: metrological support of products made by additive technology, speckle interferometer, calibration of a 3D camera and a 3D scanner

Received: 16.07.2019. Accepted: 04.09.2019.

Качество деталей, полученных методами аддитивных технологий, сильно варьируется из-за неадекватных допусков размеров, шероховатости поверхности, а также внутренних дефектов, тем самым ограничивая их широкое применение [1]. Подобная изменчивость может быть сведена к минимуму за счет управления процессом, но при том нет доступных измерительных систем, адекватно решающих метрологические задачи. Это приводит к такому состоянию, что малейшие отклонения параметров

внешних условий, возникающие в процессе изготовления, обуславливают несоответствие конечного изделия по форме или свойствам заданной модели. Поэтому разработка систем диагностики и контроля изготавливаемых изделий методами аддитивных технологий, а также их метрологического обеспечения остается актуальной.

Чрезвычайно важно также контролировать детали, формируемые методами аддитивных технологий, на наличие дефектов. В силу особенностей физических процессов, происходящих

при формировании таких изделий, в них могут возникать не только дефекты, свойственные применяемым материалам, но и поля механических напряжений. Использование аддитивных технологий целесообразно применять при изготовлении дорогих изделий со сложной формой и с заданными свойствами. С учетом подобных требований контроль за ходом технологических процессов и диагностика свойств конечных изделий остаются одними из ключевых звеньев в цепи развития аддитивных технологий.

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

Целью настоящей работы стало расширение номенклатуры измеряемых параметров, повышение точности и увеличение диапазонов измерений геометрических параметров и напряженных состояний изделий аддитивного производства, создание новых измерительных технологий и аппаратуры.

Для решения поставленных задач во ФГУП «ВНИИОФИ» был разработан комплекс аппаратуры, включающий в себя интерференционный микроскоп, 3D-камеру, 3D-сканер и электронный спекл-интерферометр, а также метрологическое обеспечение к этим приборам в виде мер и методик.

Интерференционный микроскоп позволяет исследовать отражающие поверхности с высоким аксиальным разрешением. В его основе лежит схема Линника, обладающая возможностью работать с источником низкокогерентного излучения. Микроскоп построен по «прямой» схеме: микрообъектив находится над исследуемым объектом, источник излучения – светодиод. Для сужения ширины спектра излучателя дополнительно устанавливается интерференционный светофильтр с полушириной пропускания 3 нм [2, 3].

Микроскоп может работать в двух режимах: как обычный металлографический прямой микроскоп и как интерференционный. Компонировка микроскопа позволяет менять микрообъ-

ективы, что обеспечивает разное увеличение инструмента (в отличие от аналогичного микроскопа МИА-1М, созданного на базе микроинтерферометра МИИ-4М). Оптическая система интерференционной части микроскопа размещается на вертикальной плите, которая устанавливается с помощью кронштейнов на сотовый столик. На той же плите закреплен трехкоординатный предметный столик. Таким образом, сам интерферометр неподвижен, а подвижной частью является предметный стол. Такая компоновка обеспечивает хорошую жесткость и стабильность во времени и позволяет получать устойчивые интерференционные полосы без дополнительной виброизоляции. В микроскопе реализован метод дискретного фазового сдвига. Для этого на пьезопривод, перемещающий опорное зеркало, синхронно с захватом изображений подаются дискретные значения напряжения от ПЭВМ. Такой режим работы позволяет на каждом шаге записывать и усреднять интерферограммы, что ведет к уменьшению фотометрических шумов. Для той же цели используется режим биннинга (2×2) при захвате изображений видеокамерой. Для уменьшения случайных фазовых шумов также производится усреднение полученных фазовых изображений.

Управление захватом изображений, расшивкой интерферограмм, визуализацией и обработкой полученных результатов осуществляется с помощью собственного программного обеспечения WinPhast. Для реконструкции интерферограмм был использован самокалибрующийся алгоритм, основанный на предварительной оценке фазовых сдвигов по разностным интерферограммам [4, 5] с дальнейшим вычислением фазового распределения путем



Рис. 1. Интерференционный микроскоп

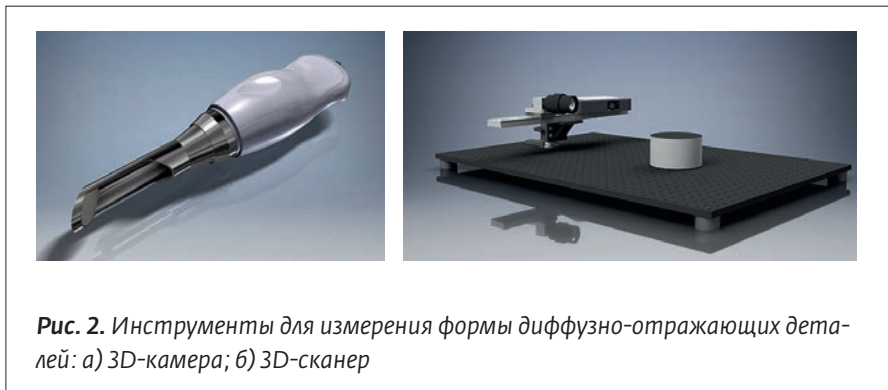


Рис. 2. Инструменты для измерения формы диффузно-отражающих деталей: а) 3D-камера; б) 3D-сканер

из определенного числа ориентированных в направлении кристаллографической плоскости (111) моноатомных ступеней кремния высотой 3,14 Å. Особенностью этих структур является то, что размер моноатомного слоя в горизонтальной плоскости может достигать сотни микрометров, что позволяет использовать их в качестве эталона высоты для оптических интерференционных

аппроксимации временной зависимости интенсивности в каждом пикселе по методу наименьших квадратов [6].

Интерференционный микроскоп обладает неопределенностью измерения высоты в диапазоне единицы и доли ангстрема, при этом нижняя граница диапазона измерений составляет единицы ангстрем. Для передачи размера единицы разработан набор мер на основе наноструктур кремния. Уникальная технология создания кремниевых наноструктур разработана Институтом физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН). Меры представляют собой набор моноатомных слоев. Технология их создания основана на управлении морфологией поверхности монокристаллического кремния на атомном уровне за счет использования эффектов самоорганизации, возникающих на атомно-чистой поверхности при прогреве в сверхвысоком вакууме [7]. Сущность методики заключается в способе изготовления мер высоты, состоящих из наборов моноатомных слоев. Меры состоят

микроскопов, латеральная разрешающая способность которых ограничена дифракционным пределом.

3D-камера (рис. 2а) и 3D-сканер (рис. 2б) предназначены для измерения формы диффузно-отражающих изделий, изготовленных методом аддитивных технологий, с помощью метода триангуляции с использованием структурированного света [6].

Для этого на исследуемую поверхность проецируется под определенным углом решетка. В случае использования 3D-камеры решетка формируется с помощью излучения, прошедшего через транспарант, коэффициент пропускания которого имеет синусоидальное распределение. В случае использования 3D-сканера решетка формируется с помощью излучения от малогабаритного LED-проектора. Далее для восстановления формы поверхности используются методы Фурье-профилометрии и фазового сдвига соответственно [6].

Для калибровки 3D-камеры и 3D-сканера были разработаны и изготовлены меры в виде набора усеченных конусов (рис. 3). Единица измерения по высоте заложена шагом между двумя соседними горизонтальными участками. Для передачи единицы измерения от эталона длины может быть использована эталонная координатно-измерительная машина. Возможно проводить как абсолютные измерения от основания конусов, так и относительные измерения высоты ступенек между собой, полностью покрывая требуемый диапазон.

Для измерения напряженно-деформированных состояний изделий аддитивных технологий разработан и изготовлен электронный спекл-интерферометр сдвигового типа (шерограф) (рис. 4). Он позволяет проводить измерения, используя методы автоматизированной сдвиговой спекл-интерферометрии с расшиф-

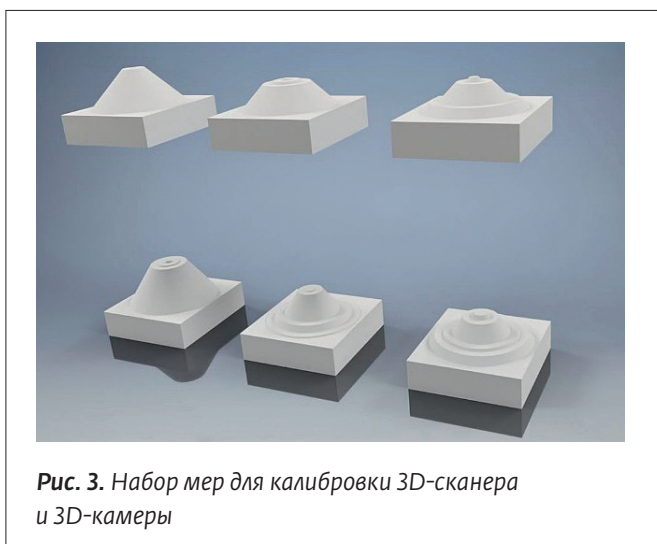


Рис. 3. Набор мер для калибровки 3D-сканера и 3D-камеры

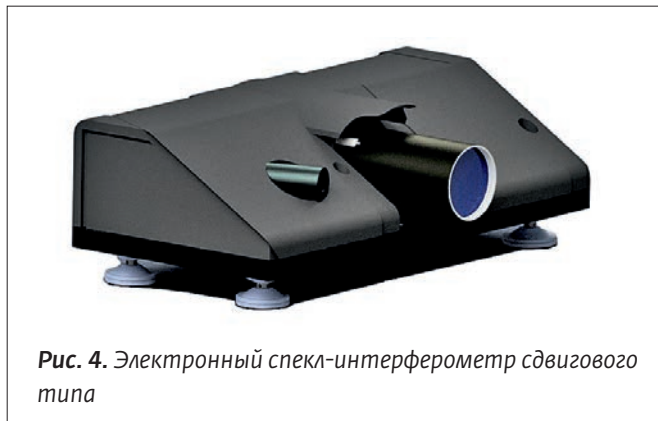


Рис. 4. Электронный спекл-интерферометр сдвигового типа



Рис. 5. Мера для калибровки спекл-интерферометра

ровкой спекл-интерферограмм методом фазовых шагов [8]. Использование объектива-трансфокатора в составе прибора позволяет изменять поле зрения.

Для метрологического обеспечения спекл-интерферометра разработана мера, воспроизводящая перемещение и напряженно-деформированное состояние (рис. 5) [9]. Мера представляет собой нагрузочное устройство со сменными мембранами. Преимущество разработанного решения состоит в возможности имитации деформации поверхности с различными физическими свойствами и характеристиками. К таким характеристикам относятся: шероховатость и волнистость поверхности; наличие дефектов, раковин и отверстий; толщина и модуль упругости материала; твердость поверхности.

Для работы со сдвиговым спекл-интерферометром нагрузочное устройство обе-

спечивает следующие требования: погрешность воспроизведения механической деформации мембраны не более 0,5 мкм; диапазон воспроизведения перемещений от 1 до 100 мкм; возможность последовательного воспроизведения как нагруженного, так и ненагруженного состояния; воспроизведение характеристик поверхности изделий с шероховатостью Rz от 3 до 20 мкм, а также Ra от 0,5 до 3,0 мкм.

Таким образом, во ФГУП «ВНИИОФИ» был разработан комплекс аппаратуры, включающий в себя интерференционный микроскоп, 3D-камеру, 3D-сканер и электронный спекл-интерферометр, а также метрологическое обеспечение к этим приборам для диагностики параметров изделий аддитивных технологий.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зленко М. А.** Аддитивные технологии в машиностроении / под ред. М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. *Пособие для инженеров*. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». 2015.
2. **Минаев В. Л., Вишняков Г. Н., Левин Г. Г.** Интерференционный микроскоп с низкокogerентным источником и супергладким опорным зеркалом. *Приборы и техника эксперимента*. 2018; 6: 98–103. doi: 10.1134 / S0032816218060265.
3. Патент РФ № 2677239. *Установка для измерения микрорельефа поверхности с использованием метода фазовых шагов* / Левин Г. Г., Вишняков Г. Н., Минаев В. Л., Иванов А. Д.
4. **Guo H., Zhang Z.** Phase shift estimation from variances of fringe pattern differences. *Applied Optics*. 2013; 52(26): 6572–6578. doi: 10.1364 / AO.52.006572.
5. **Vishnyakov G., Levin G., Minaev V., Nekrasov N.** Advanced method of phase shift measurement from variances of interferogram differences. *Applied Optics*. 2015; 54(15): 4797–4804. doi: 10.1364 / AO.54.004797.
6. **Malacara D.** / ed. *Optical Shop Testing*, 3-rd ed. – John Wiley and Sons. 2007.
7. Патент РФ № 2371674. *Способ изготовления ступенчатого высотного калибровочного стандарта для профилометрии и сканирующей зондовой микроскопии* / Щеглов Д. В., Косолобов С. С., Родякина Е. Е., Латышев А. В. от 27.10.2009.
8. **Вишняков Г. Н., Минаев В. Л., Иванов А. Д.** Электронная спекл-интерферометрия методом фазовых шагов. Сборник трудов 15-й международной научно-технической конференции «НОЛОEXPO-2018». 2018; 309–311.
9. Патент РФ 187416. *Устройство воспроизведения напряженно-деформированного состояния* / Левин Г. Г., Минаев В. Л., Иванов А. Д., Вишняков Г. Н.

REFERENCE

1. **Zlenko M. A.** Additivnye tekhnologii v mashinostroenii / pod red. M. V. Nagajcev, V. M. Dovbysh. *Posobie dlya inzhenerov*. – M. GNC RF FGUP 'NAMI'. 2015.
2. **Minaev V. L., Vishnyakov G. N., Levin G. G.** Interferenionnyj mikroskop s nizkokogerentnym istochnikom i supergladkim opornym zerkalom. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2018; 6: 98–103. doi: 10.1134 / S0032816218060265.
3. Patent RF № 2677239. *Ustanovka dlya izmereniya mikrorel'efa poverhnosti s ispol'zovaniem metoda fazovyh shagov* / Levin G. G., Vishnyakov G. N., Minaev V. L., Ivanov A. D.
4. **Guo H., Zhang Z.** Phase shift estimation from variances of fringe pattern differences. *Applied Optics*. 2013; 52(26): 6572–6578. doi: 10.1364 / AO.52.006572.
5. **Vishnyakov G., Levin G., Minaev V., Nekrasov N.** Advanced method of phase shift measurement from variances of interferogram differences. *Applied Optics*. 2015; 54(15): 4797–4804. doi: 10.1364 / AO.54.004797.
6. **Malacara D.** / ed. *Optical Shop Testing*, 3-rd ed. – John Wiley and Sons. 2007.
7. Patent RF № 2371674. *Sposob izgotovleniya stupenchatogo vysotnogo kalibrovchnogo standartarta dlya profilometrii i skaniryushchej zondovoj mikroskopii* / SHCHeglov D. V., Kosolobov S. S., Rodyakina E. E., Latyshev A. V.
8. **Vishnyakov G. N., Minaev V. L., Ivanov A. D.** Elektronnaya spekl-interferometriya metodom fazovyh shagov. *Sbornik trudov 15-oy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii 'NOLOEXPO-2018'*. 2018; 309–311.
9. Patent RF 187416. *Ustrojstvo vosproizvedeniya napryazhenno-deformirovannyh sostoyanij* / Levin G. G., Minaev V. L., Ivanov A. D., Vishnyakov G. N.