

## Оптические информационные технологии для промышленных и научных применений

Ю. В. Чугуй

*Конструкторско-технологический институт приборостроения СО РАН,  
Новосибирск, Россия*

*Новосибирский государственный университет, Россия*

*Новосибирский государственный технический университет, Россия*

e-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Решение актуальных задач науки и промышленности требует применения новейших оптических измерительных систем и лазерных технологий. В статье представлены новейшие результаты КТИ НП СО РАН применительно к решению проблем безопасности для атомной, железнодорожной, нефтяной и других отраслей промышленности.

*Ключевые слова:* оптические измерительные технологии, 3D контроль, безопасность в промышленности.

### Введение

Обеспечение на современном уровне перспективных научных исследований, а также решение актуальных проблем безопасности в атомной, железнодорожной, нефтяной и других отраслях промышленности требуют применения бесконтактных оптических измерительных систем с микро/наноразрешением и быстродействием от 500 до 100 тыс. измерений в секунду [1]. В КТИ НП СО РАН разработан, реализован и испытан ряд новейших оптических измерительных систем и технологий с использованием различных методов: теневого, триангуляционного, низкокогерентного, интерференционного, а также метода измерений на основе структурного освещения. Далее приводятся технические решения и характеристики созданных систем.

### 1. 3D оптические технологии для атомной промышленности

Обеспечение высокой надёжности тепловыделяющих сборок ядерных реакторов требует бесконтактного высокоточного контроля их компонентов, прежде всего тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) и дистанционирующих решёток (ДР).

Для бесконтактного размерного контроля ТВЭЛ ядерных реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 разработана серия оптико-электронных измерительных систем КОНТРОЛЬ и РАЗМЕР (рис. 1), которые позволяют проводить автоматические измерения наружных диаметров с высокой точностью и производительностью. Принцип действия системы основан на теневом методе измерений. Определение геометрических параметров длинномерных деталей осуществляется в процессе их протяжки по измерительной позиции. Управление устройством и обработка информации производятся компьютером.

Технические характеристики системы следующие: диапазон измеряемых диаметров — от 8 до 10 мм, погрешность измерения диаметров и овальности  $\pm 0.01$  мм, погрешность измерения непрямолинейности  $\pm 0.05$  мм на базе 250 мм, погрешность измерения длины  $\pm 0.04$  мм, погрешность измерения несоосности и оболочек и заглушек  $\pm 0.02$  мм, производительность системы — до 1000 измер./с.

Внедрение систем бесконтактного контроля геометрических параметров протяжённых изделий позволило автоматизировать этот процесс, устранить ручной труд (в том числе на опасных для здоровья участках), исключить субъективный фактор и повысить качество выпускаемой продукции.

Система КОНТРОЛЬ находится в эксплуатации в ОАО «НЗХК» с 2002 г., а в 2007 г. введена в эксплуатацию улучшенная модель системы — РАЗМЕР-06.

Для обеспечения 100%-го трёхмерного (3D) контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток широкой номенклатуры (русского и западного дизайна) в КТИ НП разработан универсальный метод измерений (рис. 2) на основе структурного освещения с использованием дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [2]. Эти решётки являются составным элементом тепловыделяющих сборок атомных реакторов. Они задают требуемые расстояния между ТВЭЛ. Универсальность метода и обеспечение требуемых метрологических характеристик измерительной системы достигается путём структурного освещения объекта волновым фронтом в виде кольца (кольцевое освещение), формируемым осесимметричным ДОЭ [3]. Таким образом можно получать информацию как в одном, так и в нескольких сечениях ячейки по глубине. В последнем случае ДОЭ фокусирует лазерное излучение в систему колец равного диаметра, расположенных вдоль оси  $Z$  ячейки с некоторым шагом (рис. 2), что позволяет получить 3D модель ячейки.



Рис. 1. Оптико-электронная система РАЗМЕР-06 для бесконтактного контроля геометрии ТВЭЛ

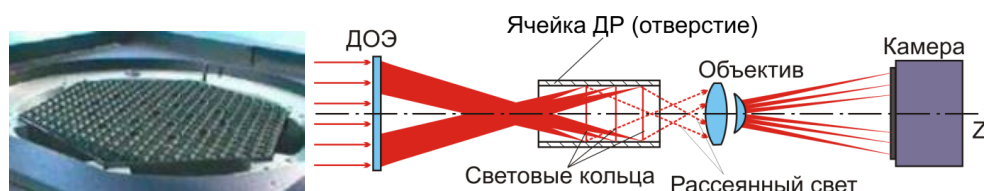


Рис. 2. Метод контроля дистанционирующих решеток на основе ДОЭ



Рис. 3. Универсальная лазерная измерительная система РЕШЕТКА-Н для контроля геометрии дистанционирующих решёток российского и западного дизайна (слева) и 3D модель измеряемой ячейки (справа)

На основе предложенного метода разработана универсальная лазерная измерительная система РЕШЕТКА-Н для контроля дистанционирующих решёток (рис. 3). С 2010 г. система находится в промышленной эксплуатации в ОАО «НЗХК».

Погрешность измерения диаметра вписанной окружности (отверстия ячейки) составила менее 6 мкм, погрешность позиционирования центра ячейки — менее 12 мкм. Производительность машины 5 изд./ч.

## 2. Лазерный диагностический контроль колёсных пар вагонов на ходу поезда

Безопасность движущихся поездов обеспечивается регулярным контролем колёс вагонов на соответствие их геометрических параметров требуемым. Институтом разработан высокоскоростной лазерный бесконтактный метод контроля (рис. 4) геометрических параметров движущихся 3D объектов на основе триангуляционных позиционно-чувствительных (PSD) датчиков с быстродействием до  $10^5$  измер./с [4].

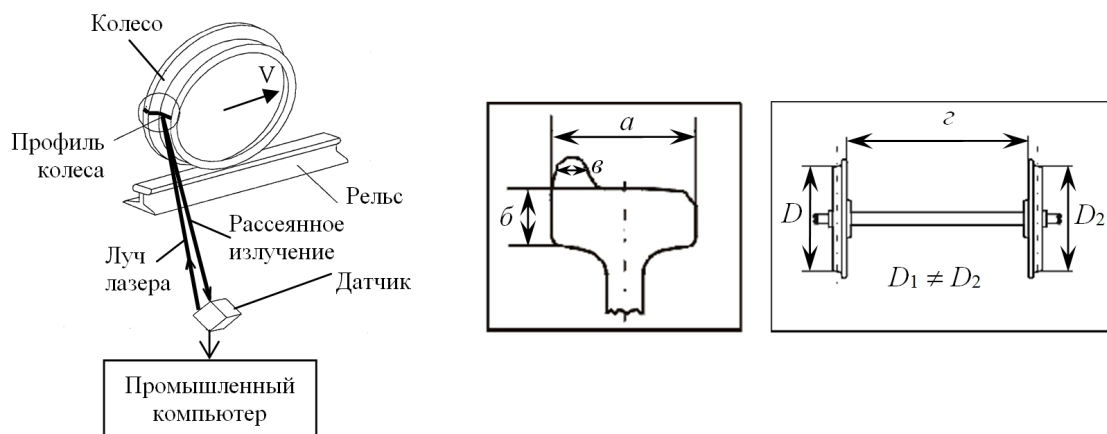


Рис. 4. Принцип действия системы контроля геометрических параметров колёсных пар вагонов во время движения поезда (слева) и измеряемые параметры колёсных пар (справа).

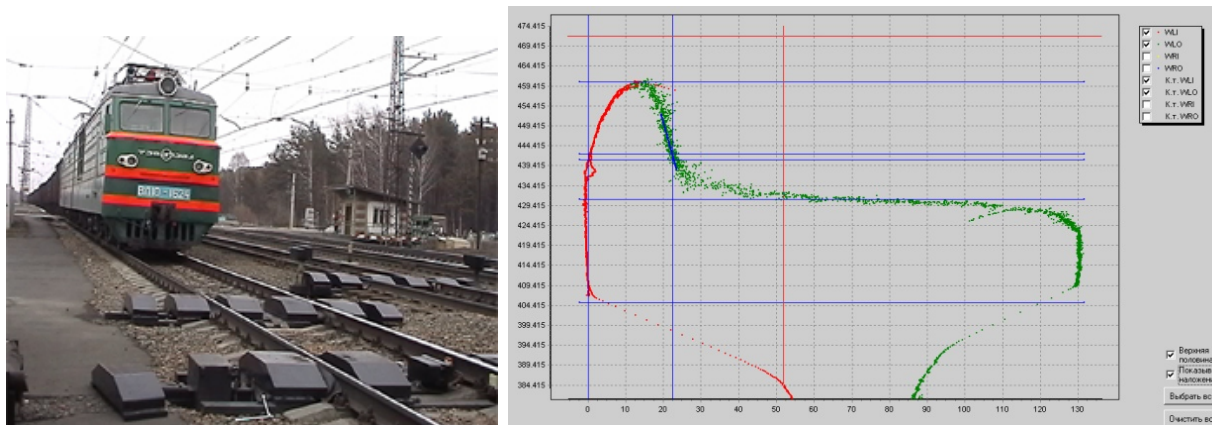


Рис. 5. Автоматическая лазерная система КОМПЛЕКС для бесконтактного контроля колёсных пар грузовых вагонов на ходу поезда, Западно-Сибирская железная дорога, станция Барышево (слева) и восстановленный поперечный профиль колеса (справа)

Разработана и создана уникальная всепогодная система КОМПЛЕКС (рис. 5) для автоматического контроля геометрии колёсных пар грузовых вагонов на ходу поезда (до 60 км/ч). Система предназначена для контроля более десятка геометрических параметров колёсных пар вагонов с быстродействием до ста тысяч измерений в секунду, работает в диапазоне температур от  $-50$  до  $+50$  °С. Она выгодно отличается от зарубежных аналогов по ценовым параметрам и функциональным характеристикам.

В основу технического решения при создании системы положен принцип самосканирования колёсной пары с использованием набора активных лазерных дальномеров (триангуляционного типа), при котором каждое из колес параллельно и независимо сканируется двумя измерительными датчиками — внутренним и наружным, установленными внутри рельсового пути и снаружи соответственно. При движении колёсной пары каждый из датчиков измеряет текущее расстояние до поверхности колеса (вдоль заданного направления измерения). В итоге формируются сигналы, отражающие текущий профиль колёсной пары в некотором сечении, угол и высота которого определяются направлениями измерения датчиков.

В настоящее время 80 таких систем успешно эксплуатируются на 15 железных дорогах России от Смоленска до Находки (системы изготавливаются совместным предприятием ООО «Сибирский центр транспортных технологий», учреждённым КТИ НП и Западно-Сибирской железной дорогой). Использование таких систем позволяет улучшить безопасность железнодорожного транспорта в России.

### 3. Система круглосуточного контроля смещений и деформаций элементов механических и инженерных конструкций

Как известно, добыча нефти и газа на шельфах осуществляется с помощью буровых платформ. Платформа является чрезвычайно массивным и инертным объектом. Для защиты платформы от возможных механических нагрузок, действующих на основание, используется четыре маятниковых подшипника скольжения (рис. 6). Они обеспечивают защиту платформы от сейсмических колебаний, движений льда, механических нагрузок при бурении, нагрузок, возникающих в связи с тепловым расширением, и др. При

прохождении пути, в среднем равном 3 км, подшипники изнашиваются. Однако если в большинстве регионов земного шара подшипники проходят этот путь за время службы платформы (30 лет), то для шельфа Сахалина, по расчётам специалистов, это время может быть от года до 10 лет, что гораздо меньше срока службы буровой платформы. Частая замена подшипников — очень трудоёмкий и дорогостоящий процесс. С другой стороны, наличие изношенного подшипника представляет большую угрозу для эксплуатации платформы и в целом для окружающей среды.

Таким образом, чрезвычайно важно отслеживать путь, пройденный подшипником. Для этой цели создана автоматическая система измерения смещения подшипников скольжения (рис. 7). Её основное назначение — постоянное бесконтактное наблюдение положения подшипника и измерение пройденного подшипником пути за указанный интервал времени. Принцип измерения основан на определении оптическим методом смещения подшипника относительно платформы.

Система рассчитана на круглосуточную работу в течение тридцати лет. Её технические характеристики: диапазон измерений смещения по осям  $X$  и  $Y \pm 350$  мм с погрешностью  $\pm 0.6$  мм, скорость измерений — более 10 измер./с, возможный диапазон скоростей перемещений без ухудшения точности — до 4 м/с, рабочая температура для стойки управления — от 0 до  $+40$  °С, рабочая температура для оптоэлектронного блока и мишени — от  $-39$  до  $+40$  °С.

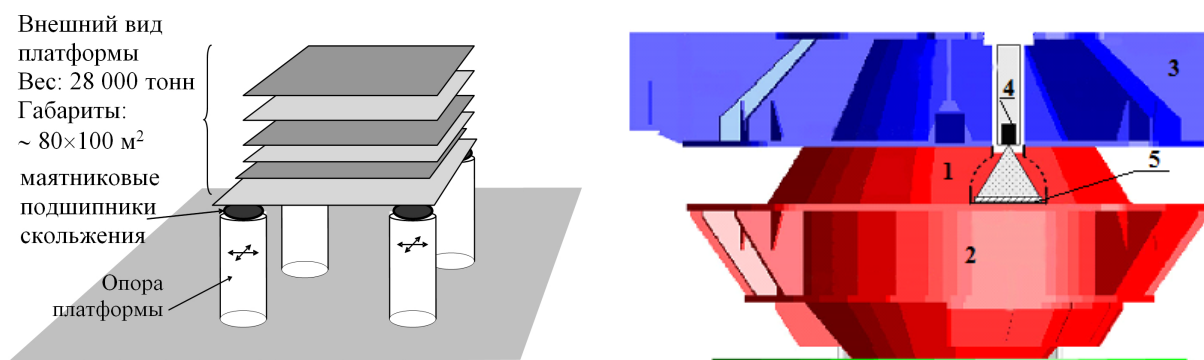


Рис. 6. Схема нефтяной платформы (слева) и принцип измерения смещения подшипника относительно платформы (справа): 1 — подшипник скольжения, 2 — основание, 3 — платформа, 4 — видеокамера, 5 — мишень

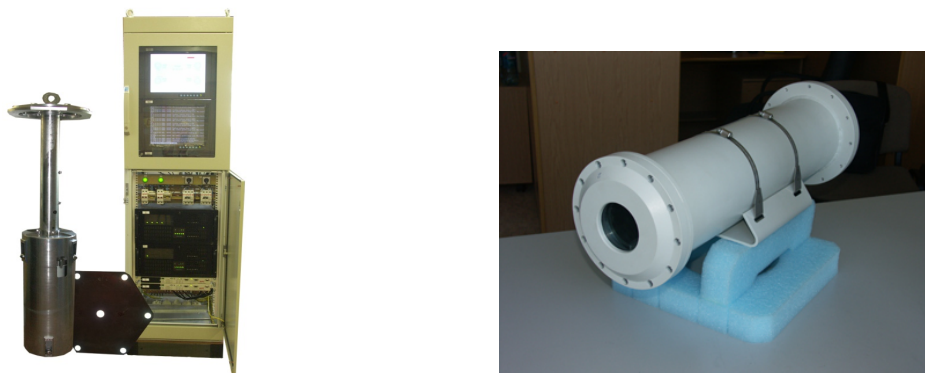


Рис. 7. Мишень, оптический и электронный модули системы (слева) и оптический измерительный блок системы контроля подшипников скольжения во взрывобезопасном кожухе (справа)

В 2006 г. система прошла тестовые испытания и принята заказчиком в эксплуатацию. Без значительных доработок данная система может также использоваться для круглосуточного измерения смещений и деформаций различных элементов механических и инженерных конструкций и выдачи оповещений об опасности.

#### 4. Низкокогерентный микро-/нанопрофилометр

Задача измерения рельефа поверхностей актуальна во многих отраслях промышленного производства как при контроле профиля изготавливаемых деталей, так и при измерении глубины дефектов поверхности, возникающих в процессе их изготовления. Для решения этих задач предложен новый метод, основанный на регистрации интерференции частично-когерентного света, рассеянного измеряемой поверхностью [5]. Это позволяет упростить измерительную схему, повысить надёжность и достоверность результатов измерений, а также добиться высокой точности и быстродействия измерений в автоматическом режиме.

На рис. 8 представлена опτικο-электронная схема системы для бесконтактного измерения рельефа поверхности с использованием интерференции частично-когерентного света. Её основным элементом является интерферометр Линника с делением амплитуды волнового фронта расходящихся пучков.

Система включает в себя компьютер 1, контроллер управления 2, интерферометр 3, размещённый на микрометрическом столике, ПЗС камеру 12. Интерферометр состоит из источника частично-когерентного света 4 (на базе галогенной лампы), согласующего объектива 5, светоделительного кубика 6, двух идентичных объективов 7 и 10, работающих с увеличением  $3.7\times$ , опорного зеркала интерферометра 8, установленного на пьезокерамику 9, 11 — измеряемый объект. Шаг и диапазон перемещения зеркала управляются контроллером. Интерферограммы регистрируются ПЗС камерой и передаются в компьютер.

Измерение рельефа поверхности осуществляется в процессе сканирования объекта по глубине с заданным шагом с помощью моторизованного программно-управляемого микрометрического столика с интерферометром. Для каждого положения интерферометра регистрируется интерференционная картина, которая позволяет рассчитать изолинию (сечение) рельефа поверхности. Исходя из таких сечений формируется 3D картина рельефа измеряемой поверхности.

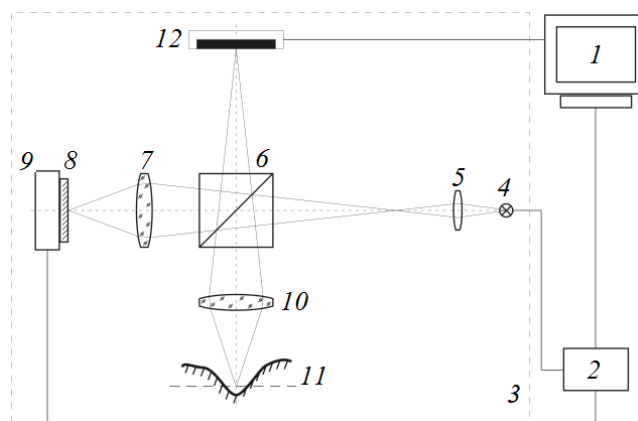


Рис. 8. Оптическая схема низкокогерентного 3D профилометра

На основе предложенного метода в КТИ НП СО РАН разработана система ПРОФИЛЬ для измерения профиля поверхности — низкокогерентный профилометр (рис. 9). Его основные технические характеристики: зона измерения  $2.3 \times 2.3 \text{ мм}^2$ , погрешность измерения по глубине 5 мкм, диапазон измерения по глубине  $\leq 10 \text{ мм}$ , время измерения  $< 15 \text{ с}$  (при глубине дефекта  $\leq 50 \text{ мкм}$ ). Система может применяться для решения широкого круга задач размерного контроля и контроля качества, в которых требуется высокоточное и достоверное измерение профиля поверхностей. В качестве примера на рис. 10 показано 3D представление профиля дефекта на оболочке ТВЭЛ и одно из его поперечных сечений. Зона измерения  $2.4 \times 1.8 \text{ мм}$ .

Профилометр успешно прошел испытания в промышленных условиях и с 2002 г. эксплуатируется в ОАО «НЗХК» на технологической линии производства ТВЭЛ.

Для решения широкого круга контрольных и измерительных задач разработан универсальный интерференционный микроскоп-профилометр МНП-1, работающий в частично-когерентном свете (низкокогерентная интерферометрия) [6]. Он предназначен для измерения как микро-, так и нанорельефа поверхностей (рис. 11). Микроскоп включает в себя интерферометр, прецизионную автоматизированную систему трёхкоординатного позиционирования экспериментальных образцов, контроллер управления, программное обеспечение.



Рис. 9. Общий вид измерительной системы ПРОФИЛЬ

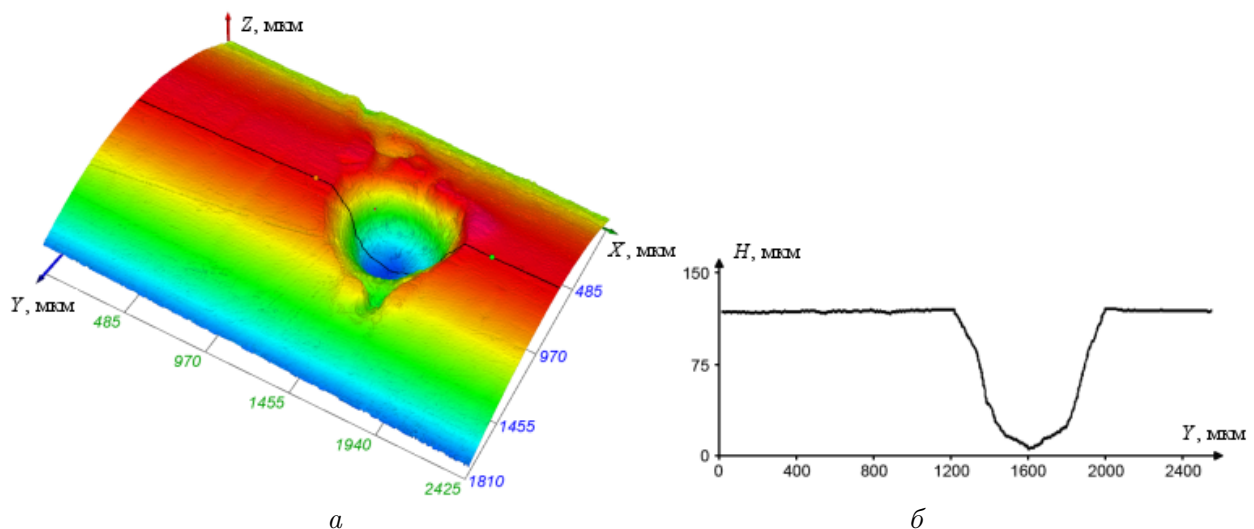


Рис. 10. Дефект на оболочке ТВЭЛ, материал цирконий, стандартная шероховатость поверхности  $R_a = 1 \text{ мкм}$ . 3D рельеф (а), сечение рельефа (б)

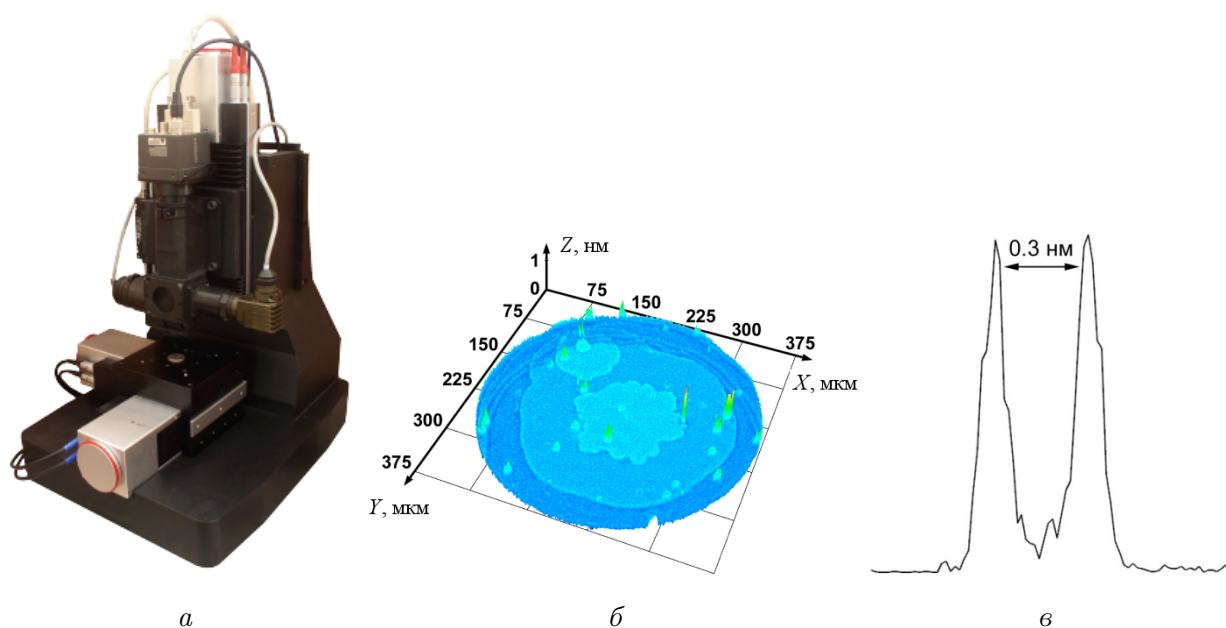


Рис. 11. Микроскоп-профилометр МНП-1 (а), 3D рельеф (б) и гистограмма высот измеренных одноатомных ступеней на поверхности кристалла Si (в). Разрешение по глубине менее 50 пм

В нанорежиме микроскоп измеряет высоту рельефа поверхностей высокого класса чистоты с разрешением менее 0.1 нм в диапазоне 0–50 мкм. Режим микроизмерений предназначен для измерения высоты рельефа “грубых” поверхностей в диапазоне 0–10 мм с разрешением менее 0.1 мкм. При использовании в МНП-1 атомно-гладкого зеркала достигается разрешение по глубине до нескольких десятков пикометров [6].

## Заключение

Для решения проблем безопасности в различных отраслях промышленности в КТИ НП разработаны и созданы десятки новейших оптико-электронных измерительных систем и технологий, которые прошли полный цикл производственных испытаний, сертифицированы и находятся в промышленной эксплуатации в атомной, нефтегазовой отраслях, а также на железнодорожном транспорте.

Так, в ОАО “НЗХК” в течение многих лет эксплуатируется более десятка систем для автоматического бесконтактного контроля с микронным разрешением геометрических параметров компонентов тепловыделяющих сборок — ТВЭЛ, дистанционирующих решёток и др. Их применение позволило получить объективную информацию о геометрии изделий, которая была использована для улучшения технологии производства тепловыделяющих сборок российских ядерных реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440.

Более 10 лет на железных дорогах России находится в промышленной эксплуатации не имеющая аналогов в мире автоматическая лазерная диагностическая система КОМПЛЕКС для бесконтактного контроля геометрии колёсных пар грузовых вагонов на ходу поезда (до 60 км/ч). Восемьдесят образцов таких систем уже внесли ощутимый вклад в повышение безопасности движения поездов на 15 железных дорогах России от Смоленска до Находки.



Более семи лет в нефтегазовой отрасли на шельфе острова Сахалин (месторождение ЛУНа) эксплуатируется автоматическая система измерения смещения подшипников скольжения нефтегазовых платформ. Система прошла сертификацию как средство измерения и сертифицирована для работы во взрывоопасных условиях. Она рассчитана на круглосуточную работу в течение тридцати лет. Её применение позволило повысить безопасность эксплуатации такой гигантской конструкции, как нефтегазовая платформа. Система может быть также использована для круглосуточного мониторинга сдвигов и деформаций крупных механических и инженерных конструкций в экстремальных ситуациях (землетрясение, цунами и др.).

Для бесконтактного автоматического контроля рельефа широкого класса поверхностей объектов с высоким разрешением разработаны и созданы система ПРОФИЛЬ и универсальный микроскоп-профилометр МНП-1, работающие в частично-когерентном свете (низкокогерентная интерферометрия). Система ПРОФИЛЬ обеспечивает измерение профиля поверхности в широком диапазоне по глубине (до 10 мм). С 2002 г. она успешно эксплуатируется в ОАО «НЗХК» в технологической линии производства ТВЭЛ. В отличие от системы ПРОФИЛЬ прибор МНП-1 может выполнять измерения объектов как в микрорежиме (в диапазоне до 10 мм с разрешением 0.1 мкм), так и в нанорежиме (в диапазоне до 50 мкм с разрешением 0.1 нм). Применение в интерферометре атомно-гладкого зеркала позволило достичь рекордного разрешения по глубине — до десятков пикометров. Микроскоп-профилометр МНП-1 может быть эффективно использован в микроиндустрии, а также для приборного обеспечения научных исследований.

## Список литературы

- [1] CHUGUI YU.V., PLOTNIKOV S.V., POTASHNIKOV A.K., VERKHOGLIAD A.G. Novel optical measuring systems and laser technologies for science and industry // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6280. P. 628003-1–628003-10.
- [2] ЗАВЬЯЛОВ П.С., ЛЕМЕШКО Ю.А., ФИНОГЕНОВ Л.В., ЧУГУЙ Ю.В. Трёхмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов // Автометрия. 2008. Т. 44, № 2. С. 23–31.
- [3] FINOGENOV L.V., LEMESHKO YU.A., ZAV'YALOV P.S., CHUGUI YU.V. 3D laser inspection of fuel assembly grid spacers for nuclear reactors based on diffraction optical elements // Measurement Science and Technology. Institute of Physics, UK. 2007. Vol. 18, No. 6. P. 1779–1785.
- [4] БАЙБАКОВ А.Н., ГУРЕНКО В.М., ПАТЕРИКИН В.И., ЮНОШЕВ С.П. и др. Автоматический контроль геометрических параметров колёсных пар во время движения поезда // Автометрия. 2004. Т. 40, № 5. С. 94–103.
- [5] GOLUBEV I.V., SYSOEV EU.V., CHUGUI YU.V. Low-coherent interferometry defects measurements // Proc. XVI IMEKO World Congress. Vienna, Austria, 2000. Vol. 2. P. 189–194.
- [6] CHUGUI YU.V., LATYSHEV A.V., MAKAROV S.N. ET AL. 3D optical measuring technologies for scientific and industrial applications // Proc. 10th IMEKO Symp. Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry (LMPMI-2011). VDI-Berichte. Dusseldorf, 2011. No. 2156. P. 13–22.

*Поступила в редакцию 29 ноября 2013 г.*