

# Мультифункциональная испытательная установка

## для автоматизированного определения механической прочности конструкций

В одном из финансируемых немецким министерством по образованию и науке совместном проекте с названием «Разрушительная и неразрушительная испытательная техника для охарактеризования наноскалированных механизмов старения на высокоминиатюризованных паяных соединениях», коротко «НаноPAL», будет исследован новый вид механизмов старения наноскалированных соединительных конструкций. Основной целью этого проекта является разработка как нового вида испытательного прибора, так и соответствующего процесса испытаний для определения термомеханической надежности.

**Дирк Шаде**  
(Dirk Schade)  
**Уве Папе**  
(Uwe Pape)  
**Йенс Кокот**  
(Jens Kokott)  
**Вальдемар Каммрат**  
(Waldemar Kammrath)  
**Михаэль Дост**  
(Michael Dost)

dirk.schade@xyztec.com

### Введение

Новая высокоточная установка для испытания силы на срез в различных граничных температурных условиях должна обладать соответствующими термостатическими возможностями. Высокие требования предъявляются к точности механического испытания. Поэтому необходима автоматическая юстировка и корректировка ошибки с помощью оптического контроля (высокоточная система обработки изображений). Этот прибор отличается от обычных испытательных установок для измерения силы на срез за счет интегрированного модуля ползучести. Определенная деформация ползучести с небольшими скоростями деформации, наряду с измерениями прочности, делает возможным анализ ползучести с учетом объемов и поверхностных дефектов. Насколько это

возможно, необходимы автоматизированные испытания миниатюризованных контактов, для этого прибор обеспечивается информацией посредством уже существующих данных топологии платы и оптического контроля. При помощи этих данных можно быстрее и точнее настроить систему для испытаний. Применение рекомендуемых образцов, которые могут быть зафиксированы в памяти программного обеспечения прибора, дает возможность получить значения для сравнения и более совершенное обоснование прогноза надежности.

В связи с изменениями требований к окружающей среде при изготовлении электронных узлов, связанных с «опасными веществами» [1], Европейским союзом была принята важная директива. Введение бессвинцовых припоев при изготовлении электронной продукции с 1 июля 2006 года активизировало исследовательскую деятельность для определения свойств их обработки и технической надежности, для того, чтобы с точки зрения заказчика можно было выпускать равноценную продукцию.

При различных исследованиях всегда принимается в расчет механическая прочность электронных узлов. Простая возможность такого испытания состоит в исследовании силы на срез различных компонентов, причем в первую очередь рассматриваются значения силы на срез двухполюсников. Структуры и компоненты становятся все меньше по габаритам (рис. 1), что приводит к повышению требований как к промышленному оборудованию, так и к пользователям. «Человеческий фактор», так же как и уже существующие дефекты производства, например, слегка развернутые или опрокинутые компоненты, усложняют надежное измерение силы на срез. Развернутые или опрокинутые компоненты, неправильное расположение инструмента для измерения, ошибочные

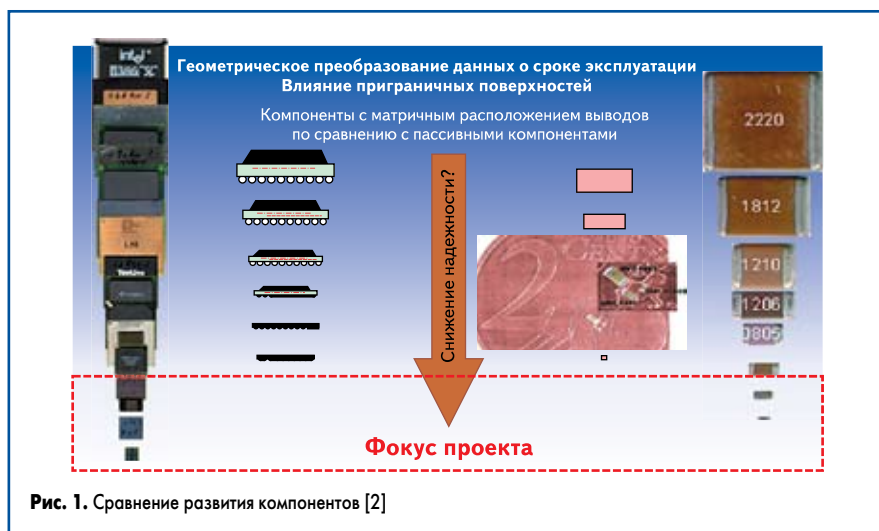


Рис. 1. Сравнение развития компонентов [2]

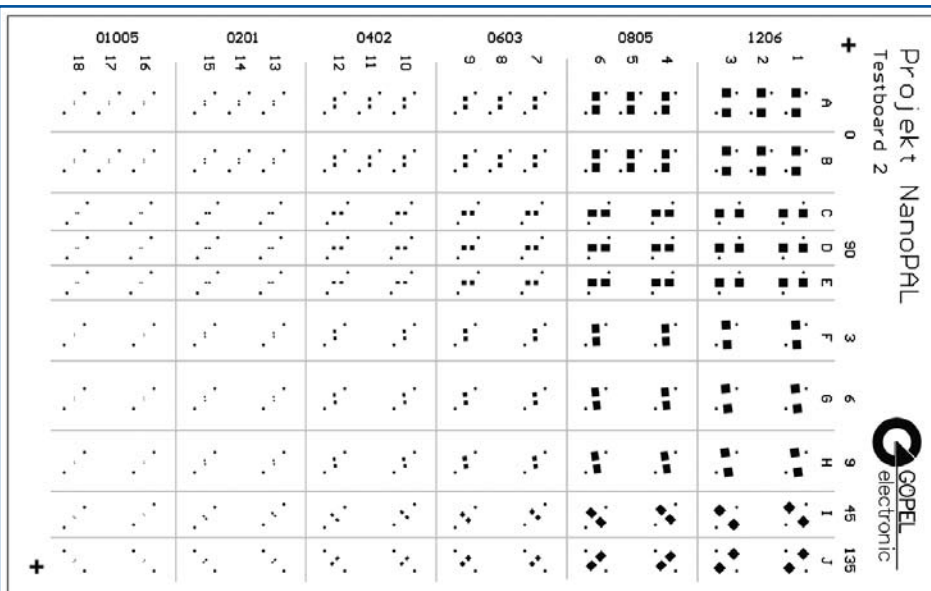


Рис. 2. Версия 2 схемы тестовой печатной платы

параметры испытаний или даже неверное направление нагрузки, в зависимости от типоразмера компонента, оказывают значительное влияние на определение силы на срез. Сегодня техника не дает возможности провести автоматизированные и высокоточные испытания высокоминиатюризованных компонентов и анализ ошибки разворота по осям X, Y или отклонения по оси Z за счет асимметричного зазора паяного соединения. (При дальнейшей миниатюризации вплоть до наносоединений увеличивается влияние этих факторов.)

Чтобы установить корреляцию между силой на срез и картиной дефекта, в первой части проекта испытательные платы были оснащены высокоминиатюризованными компонентами и стандартными двухполюсниками. Печатная плата спроектирована таким образом (рис. 2), что на ней видны все повороты и отклонения компонентов, встречающиеся на практике и далекие от нее. Свинцовые припои при пайке не применялись.

### Машинная техника и методика испытаний

#### Основная идея

Во избежание производственного брака, в частности, для минимизации выхода из строя компонентов, рекомендуется предоставить производителям методику испытаний, которая, с одной стороны, позволит получить высокоточные и воспроизводимые результаты, а с другой — при этом потребует минимум времени на монтаж и измерения. Существующее стандартное оборудование для испытания силы на срез очень удобно для использования. Однако этого еще недостаточно для того, чтобы испытывать высокоминиатюризованные компоненты с такой точностью, чтобы с помощью результатов силы на срез можно было установить корреляцию надежности или дефекта.

#### Принцип испытания силы на срез

Компоненты, припаянные на монтажную плату (FR4 или LTCC), закрепляются в само-



Рис. 3. Держатель для установки аппликации

дельном приспособлении для фиксации (держателе) (рис. 3).

С помощью XY-манипулятора осуществляется параллельная юстировка аппликации к инструменту для испытания силы на срез (современный инструмент — резец — как правило, изготавливается из вольфрама карбида или вольфрама титана). Резец находится в системе измерения силы, которая в свою очередь закрепляется на электрически управляемой оси Z. При помощи опускания оси Z осуществляется грубая регулировка положения высоты по оси Z по отношению к компоненту. Большое значение имеет регулировка положения резца точно между двумя контактными площадками компонента.

Высота должна быть выбрана таким образом, чтобы можно было осуществлять автоматическую установку. Только автоматическая установка высоты гарантирует пользователю точность воспроизведения испытаний. После начала проведения процедуры испытаний пользователем прибор производит так называемое приземление, касание (“touch down”). При этом резец движется вниз к аппликации

и заземляется. Важно, что при этом не может произойти неконтролируемого прогиба электронного модуля. При распознавании нулевого значения запускается заранее определенное значение высоты (высота приложения нагрузки на срез). Только в этот момент начинается сама процедура испытаний. При скорости нагрузки на срез, также заданной заранее, компонент по оси Y прижимается к резцу. При взаимодействии с компонентом на резце накапливается сила, которая нарастает линейно. По мере увеличения силы растет напряжение в паяном соединении, которое при определенном значении силы испытывает резкую деформацию. Это заданное значение силы заносится в базу данных и оценивается статистически.

#### Необходимые юстировки (подгонки)

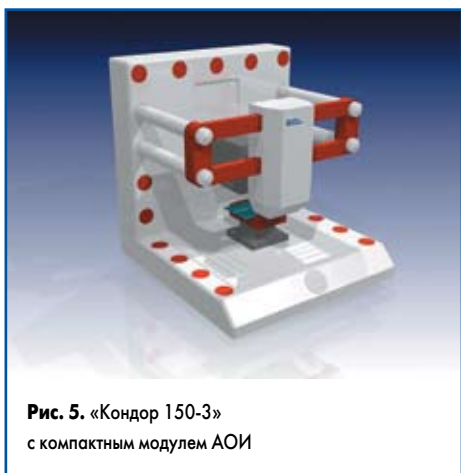
Для оптимального выполнения поставленных задач необходимо было произвести юстировку с XY-манипулятором, дополнение вращающимся модулем и многочисленные согласования программного обеспечения. Что здесь звучит просто, является, однако, достаточно сложным делом. Во время предварительных исследований, проведенных в Институте надежности и микроинтеграции (IZM) им. Фраунгофера, система «Кондор 150-3» (рис. 4) была оснащена револьверной головкой, в которую были встроены четыре датчика силы. Эти четыре датчика покрывают различные области нагрузки. Для более оптимального распределения нагрузки необходимо так выбрать резцы, чтобы все компоненты были испытаны с помощью этих четырех датчиков. Посредством высокоразрешающей камеры и закрепленного на XY-манипуляторе вращающегося стола были произведены первые полуавтоматические испытания силы на срез с компонентами типоразмера 0201. Достигнутые результаты могут повлиять на точное проектирование модуля автоматической оптической инспекции. Большое расстояние между резцом и камерой показало недостатки этой конструкции. Но еще до разработки компонентов автоматической оптической инспекции эта конструкция позволила обеспечить как методику, так и процесс испытаний.



Рис. 4. Конструкция для испытаний «Кондор 150-3», IZM, Берлин

**Модуль автоматической оптической инспекции**
**Определение параметров автоматической оптической инспекции**

Автоматическая оптическая инспекция (АОИ) — распространенный и надежный процесс в современных испытаниях качества электронных узлов. В комбинации с мультифункциональной экспериментальной установкой для монтажа это, в самом деле, очень необычная конфигурация. В первой фазе механическая конструкция, в которой находится оптика, будет статичной. На протяжении всего проекта будет производиться динамическая подгонка конструкции к другим компонентам. Важным требованием для сочетания машин друг с другом было правило «простого управления». Другими критериями были компактность и дополнительное оснащение существующих систем (рис. 5).



**Рис. 5.** «Кондор 150-3» с компактным модулем АОИ

Для оптимального использования рабочей области машины необходимо в принудительном порядке сократить расстояние между камерой и вращающимся измерительным устройством (ВИУ). За счет специально изготовленного устройства для изменения направления луча было достигнуто уменьшение расстояния до 2 мм. При изготовлении устройства для изменения направления луча особое внимание уделялось тому, чтобы траектория лучей позволяла объединить источники света в различных точках. Не менее важным считалась возможность дополнительного оснаще-

**Таблица. Параметры АОИ**

Обозреваемая область (FOV)	6,5×4,9 мм
Разрешение	4 мкм/пиксель
Контраст	0,5 мм 1,0 мм (≈50 мкм размывка кантов)
Степень свободы компонента	12 мм
Освещение	Светодиоды
Направление взгляда на объект	Вертикальный или под углом

ния системы лазерной триангуляции (рис. 6). Параметры АОИ представлены в таблице.

При определении параметров АОИ и соответствующем выборе оптических компонентов стало возможным оборудовать прибор с помощью АОИ-модуля, как показано на рис. 7. Для освещения применяется специально изготовленное светодиодное освещение для плоских поверхностей. Обнаружение компонента происходит посредством черно-белой камеры. Это устройство распознавания изображения имеет дополнительно собственное уникальное освещение, которое состоит из основных цветов (красный – зеленый – синий). Последовательность вспышек генерируется с помощью специального управляющего прибора.

При необходимости, из появившихся таким образом черно-белых изображений с разной подсветкой пользователь может создать цветное изображение.

**Программное обеспечение системы измерения АОИ**

Комбинация машин управляется двумя взаимосвязанными комплексными программными пакетами. Оба программных модуля работают на базе банка данных, причем сделано четкое разграничение между ПО АОИ и ПО измерительной системы. Необходимая для определения компонента библиотека, и без того насыщенная данными (рис. 8), становится «интеллектуальной». Специальная информация программного обеспечения для измерений может быть сохранена для каждого компонента, для всех компонентов одного вида или для каждой печатной платы.

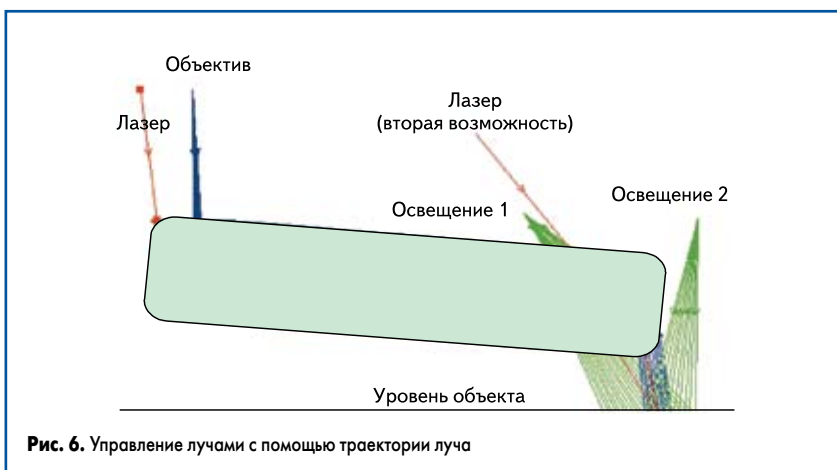
Формирование испытательных программ для испытаний силы на срез реализуется в предусмотренном для этого программном обеспечении для измерений. Модуль АОИ управляет всеми библиотеками компонентов и параметрами, используемыми и необходимыми для АОИ. Программное обеспечение из-

мерительных систем управляет непосредственно процессом измерения и полученными значениями измеренной силы. За счет исчерпывающе оформленного статистического модуля пользователю предоставляется отличная возможность разработать микропрограммное управление (SPC), ориентированное на свободно программируемый анализ. Благодаря этому программное обеспечение измерительной системы обладает программой мониторинга статистического анализа в режиме реального времени. Ошибки или небольшие отклонения действительных значений сразу становятся видны пользователю на специальных сигнализирующих полях. Справочные данные, сохраненные в базе данных, позволяют гораздо быстрее локализовать картину ошибки, что в свою очередь приводит к короткому времени вмешательства в технологический процесс. Таким образом, устраняется постоянная необходимость проведения длительных испытаний термоциклированием. На рис. 9 представлен операционный график — короткая интерпретация внешних и внутренних процессов управления с окончательным анализом результатов.

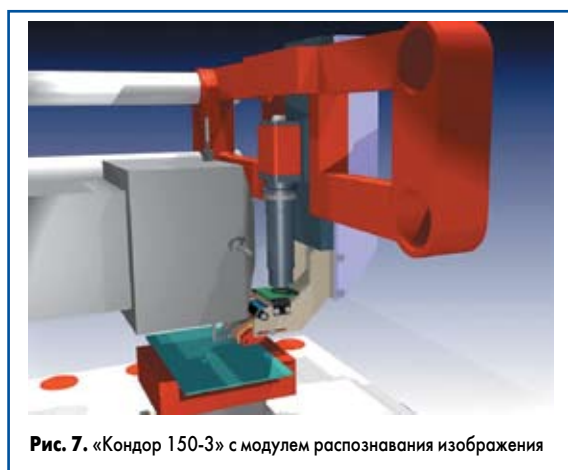
**Модуль ползучести**

Испытания в области технологии монтажа и соединений электронных узлов с очень низкими скоростями деформации не являются открытием. В любом случае, требования к этим испытаниям с все более возрастающей миниатюризацией стали заметно строже. Однако надо отметить, что механические компоненты и способность средств для испытания силы на срез в области наноизмерений значительно выигрывают по качеству. Учитывая то, что еще не существует по-настоящему стандартизированного процесса испытаний на ползучесть, во второй части проекта «НаноPAL» предусмотрена разработка такого испытательного оборудования.

После некоторых испытаний было достаточно быстро установлено, что интеграция модуля ползучести в имеющуюся базисную машину «Кондор 150-3» является очень непростым процессом, так как наиболее низкая собственная гибкость комбинации установок не была задана. Это, конечно, высшее требование, чтобы никоим образом не влиять на помехи, возникающие в процессе движения



**Рис. 6.** Управление лучами с помощью траектории луча



**Рис. 7.** «Кондор 150-3» с модулем распознавания изображения

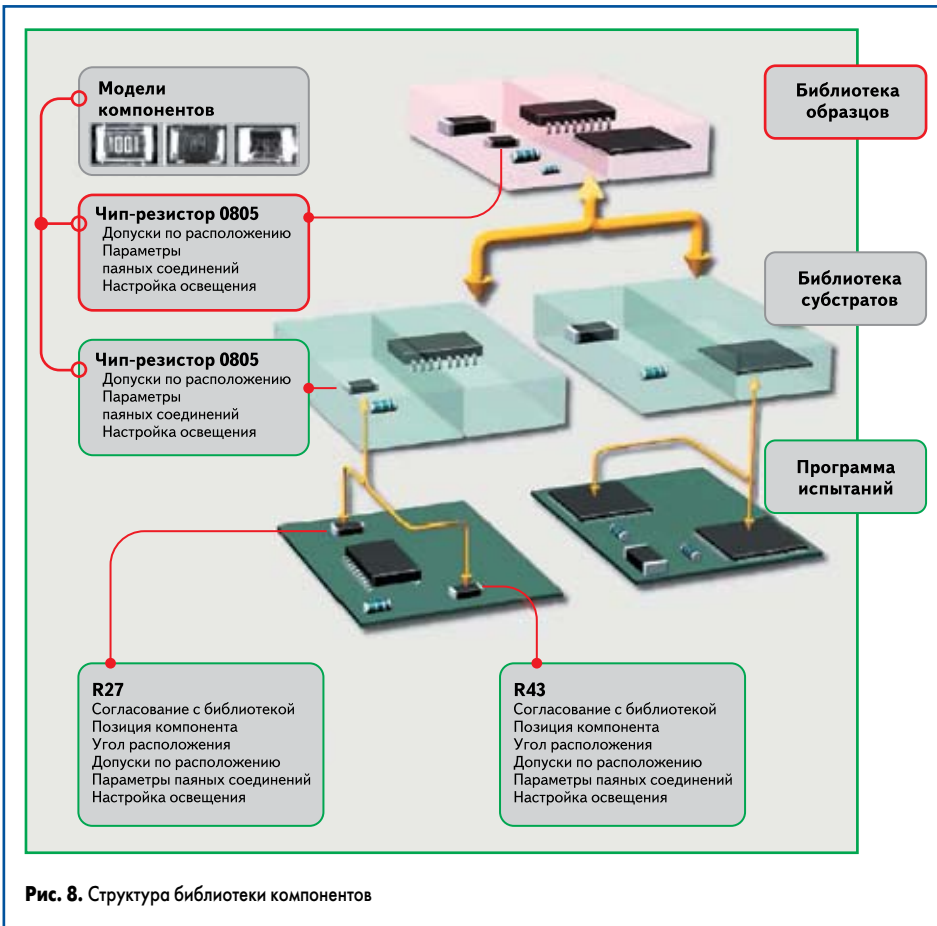


Рис. 8. Структура библиотеки компонентов

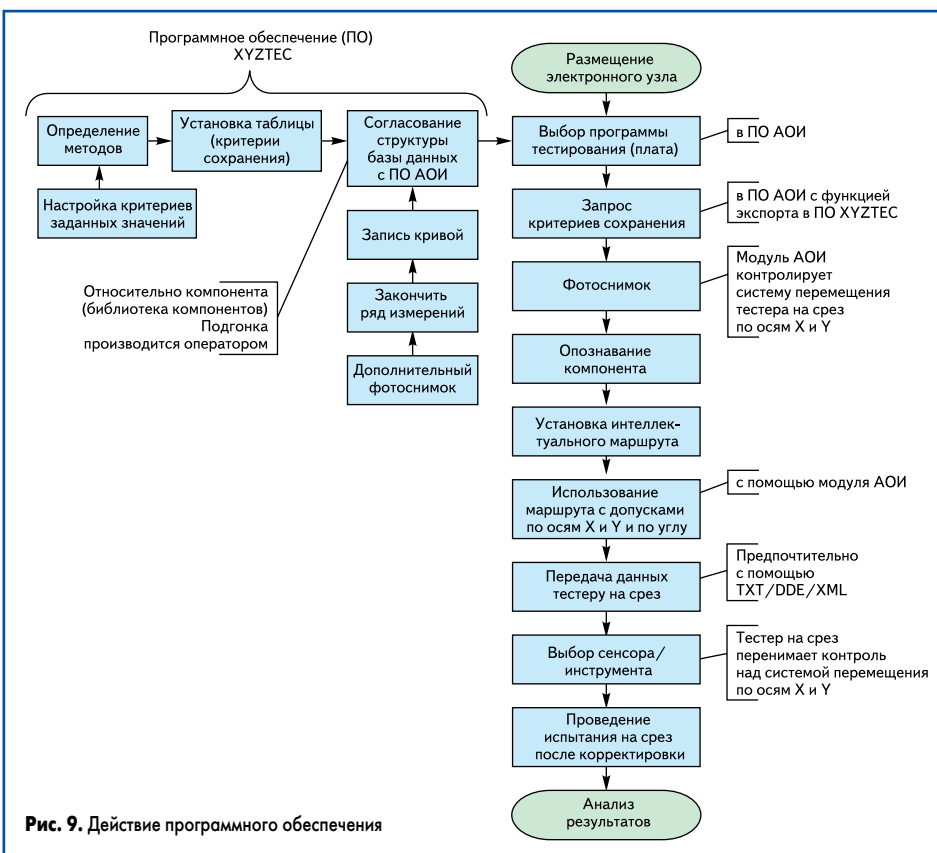


Рис. 9. Действие программного обеспечения

в самой аппаратуре. Причина этого условия состоит в том, что на записанной диаграмме невозможно увидеть разницу между чистым движением образца и деформацией, из-за чего впоследствии нельзя рассчитать это значение из измеренной кривой. Чтобы добиться требуемой жесткости, нужно отказаться от из-

начально предполагаемой балкообразной конструкции, вместо которой выбрана конструкция, которая напоминает портал с расширенными книзу опорами. При таком же определении параметров эта конструкция, только за счет своей формы, увеличит коэффициент жесткости — от 8 до 15. Исследования показа-

ли, что оптимальной будет оснастка несущих конструкций дисками, что позволит минимизировать количество резьбовых соединений.

Этот портал изготавливается не из одного куска материала, а закрепляется путем закручивания и приклеивания на плоско-параллельную, гладко отшлифованную мраморную плиту. На поверхности мраморной плиты монтируется комбинация, состоящая из крестообразного столика (движение по осям XY) и вращающейся платформы (рис. 10).



Рис. 10. Вращающаяся платформа

Это позволит, с одной стороны, сместить вращающийся уровень вниз. При этом место измерения всегда будет находиться в середине вращения, независимо от того, как движутся находящиеся над ним два линейных стола. Хотя поверхности крестового столика двигаются перпендикулярно по отношению друг к другу, все же направление движения можно выбрать. С другой стороны, если в процессе измерения появятся требования, что столы должны двигаться в строго определенных направлениях (например, север/юг, запад/восток), то порядок расположения столов изменится: уровень вращения будет смещен вверх. Точка замера при этом не остается в центре (рис. 11), чем в процессе многих измерений можно пренебречь.



Рис. 11. Прибор для испытаний ползучести

Сегодня для того, чтобы добиться еще большей жесткости, планируется механически застопорить все приостановленные во время замеров движения. В середине поперечной балки портала расположены прямолинейные направляющие для различных резов. Балка обеспечивает передвижение резов таким образом, чтобы острие каждого из них находилось непосредственно над пластиной, после чего она закрепляется. При выборе элементов измерения силы особое значение придается минимальному изменению формы измерительных головок под нагрузкой. Параллельные линии оснащаются стеклянными масштабными линейками, которые обеспечивают разрешение движения от 1/100 мкм (как было предусмотрено для первого прототипа). Дальнейшие усовер-

шенствования этого измерительного решения возможны и после первых испытаний, они будут включены в концепцию готовности установки к серийному производству. В дальнейшем будет сконструировано удерживающее устройство, которое будет обеспечивать интеграцию уже описанного модуля АОИ. С помощью содержащихся в этом модуле оптических компонентов будет интегрирован еще один процесс: корреляция изображения для анализа деформации (универсальный анализ деформации корреляцией, UNIDAC).

### Процесс универсального анализа деформации корреляцией

Этот процесс относится к группе АДК (анализ деформации корреляцией) процессов (микро-АДК, лазер-АДК, нано-АДК), при которых можно произвести измерения сдвига и деформации различных видов при минимальных экспериментальных затратах. Локальные сдвиги и области сдвигов будут определяться оптическим путем и, с помощью цифровой обработки изображения, могут быть представлены и описаны как качественно, так и в численных значениях. Базой для определения являются цифровые полутоновые изображения с минимум двумя различными состояниями исследуемого объекта (например, нагруженный/ненагруженный, холодный/горячий, сухой/влажный, изменения позиции). Как правило, они записываются на ПЗК-камеру и считываются на компьютере через программное обеспечение для передачи изображения, порт USB или порт Wi-Fi. Для каждого двух состояний с помощью цифровой обработки изображения, при применении специальных алгоритмов для корреляции полутонов обнаруживаются плоскостные сдвиги, которые проявились при состояниях нагрузки. В результате корреляции возникает графическое изображение плоскостной области сдвига, представленное в качестве векторного поля (рис. 12), причем векторы указывают численное значение и направление деформации. Существует возможность показывать сдвиги с помощью наложенных сеток или в виде изображения, закодированного в цвете. Прилагаемый к этому протокол для каждого обработанного пункта представляет:

- позиции по осям X и Y;
- сдвиги по осям X и Y;



Рис. 12. Принцип анализа деформации

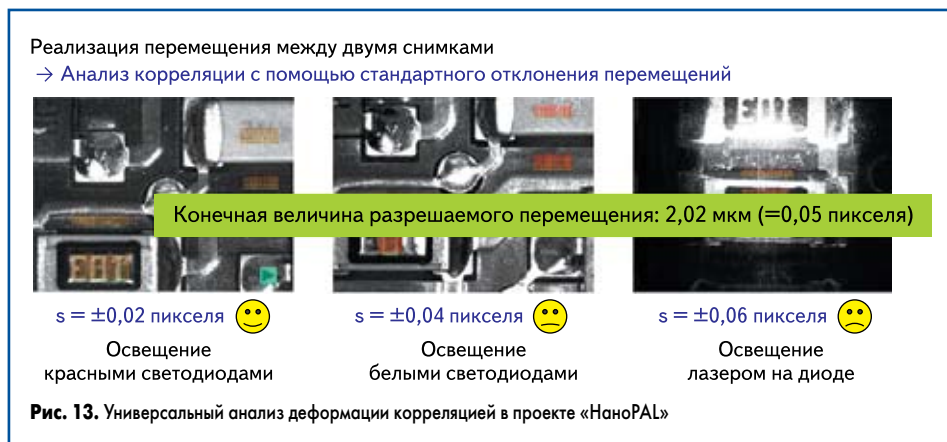


Рис. 13. Универсальный анализ деформации корреляцией в проекте «НаноPAL»

- максимальный корреляционный коэффициент.

На основе этих результатов корреляции при применении соответствующего программного обеспечения (Excel, Surfer) можно получить качественные и количественные формулировки процессов деформации материалов, комбинаций материалов и компонентов при различных нагрузках (механические и/или температурные, влажность и т. п.) и расширить информацию до следующего ряда величин, например, продольная деформация, сжатие, скорость изменения формы, адгезионные свойства, характеристика разрыва. Величина разрешаемых сдвигов устанавливается посредством величины области изображения, разрешения

камеры в пикселях и разрешенного сдвига субпикселя (примерно 0,1 пикселя).

Специальной подготовки поверхности, как правило, не требуется. При применении соответствующей съемочной техники или в комбинации с микроскопическими приспособлениями можно исследовать процессы в микро- и нанообластях.

Также возможна оценка изображений, полученных с помощью специальной высокоскоростной камеры. В особых случаях процесс связан с миниатюризированными компонентами (типоразмера 0201 или 01005). Интегрированный в модуль ползучести, универсальный анализ деформации корреляцией определяет деформацию ползучести паяльных материалов, которые оказывают влияние на надежность. Показанные на рис. 13 испытания представляют первый этап в этой, еще не законченной фазе проекта.

### Литература

1. Directive 2002/95 EC of the European Parliament and of the Council of 23 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. [http://europa.eu.int/eur-lex/pri/en/oj/dat/2003/l\\_037/l\\_03720030213en00190023.pdf](http://europa.eu.int/eur-lex/pri/en/oj/dat/2003/l_037/l_03720030213en00190023.pdf)
2. BMBF-Projekt Rahmenplan "nanoPAL": Zerstörende und zerstörungsfreie Prüftechnik für die Charakterisierung von nanoskaligen Alterungsmechanismen an hochminiaturisierten Lötverbindungen.