

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОРУНДОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ И ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ ЗОНЫ КОНТАКТА

В статье рассматриваются основы нового подхода к контактным измерениям размеров изделий с возможностями компенсации возникающих контактных упругих деформаций за счет измерения размеров зоны контакта и определения ее центра. Совместное использование корундовых измерительных наконечников и встроенного измерительного микроскопа позволяет реализовать это за счет видеорегистрации зоны контакта.

Получены выражения для зависимостей контактных упругих деформаций от размеров зон контакта для трех вариантов контактирования сферического наконечника: с плоской, выпуклой и вогнутой поверхностями изделий. Обсуждается возможность определения координат центра зоны контакта. Анализируются экспериментально полученные изображения зон контакта при освещении некогерентным оптическим потоком. Рассматриваются возможности повышения качества регистрации изображений зоны контакта.

Ключевые слова: видеорегистрация зоны контакта, расчет деформаций, компенсация деформаций, сверхширокоугольный объектив, сапфировый наконечник, центр зоны контакта, поворот матрицы регистратора, контактные измерения.

Введение. Несмотря на значительный прогресс за последние 30–50 лет в развитии бесконтактных измерений размеров изделий контактные измерения по-прежнему широко распространены из-за своей простоты и доступности [1–5]. Возможность достижения существенных преимуществ при переходе от контактных к бесконтактным измерениям для ряда задач не очевидна из-за влияния на точность измерений параметров поверхности изделия, составляющими которых являются шероховатость поверхности, наличие оксидной пленки и т.п.

Компромиссом между контактными и бесконтактными могут быть гибридные методы и средства измерений, заменяющие при необходимости и первые, и вторые [6–8]. Один из вариантов развития гибридных методов и средств

измерений заключается в использовании оптических эффектов, улучшающих характеристики контактных измерений. Так, контактирование измерительного наконечника и изделия с заданным измерительным усилием приводит к появлению области контактных упругих деформаций (в дальнейшем по тексту — деформации) l_g в виде зоны контакта. Использование же видеорегистрации и измерения размера этой зоны контакта при условии прозрачности наконечника позволяет считать l_g и в итоге скомпенсировать результат измерения.

В данной статье обсуждаются общие подходы и особенности образования, визуализации, видеорегистрации, корректировки получаемого изображения и измерения размеров зоны контакта при совместном использовании корундовых

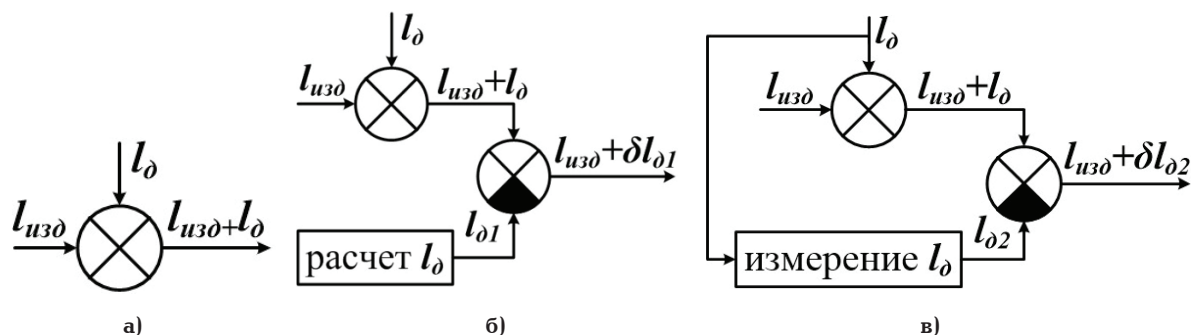


Рис. 1. Схемы контактных измерений: а) без компенсации деформаций; б) с компенсацией деформаций, определенных расчетным путем; в) с компенсацией измеренных деформаций

Таблица 1

Методики расчета значений деформации l_{g1}

№	Автор методики	Формулы для расчета контактной деформации l_g
1	Крагельский И. В.	1 этап — $l_{g1} = 82,53 \sqrt{\frac{\Theta N^2}{r}}$ 2 этап — $h_{\Sigma} = h + 1,8 \cdot H_b^{0,85} R_b^{0,15} (\Theta_{\Sigma} p_a)^{0,3}$
2	Марков Н. Н.	$l_{g1} = 0,433 \sqrt{\frac{Q^2}{R_{ин}}}$
3	Решетов Д. Н.	$l_{g1} = 4,1073 \sqrt{\frac{Q^2}{\gamma^2}}$
4	Писаренко Г. С.	$l_{g1} = 0,82553 \sqrt{\frac{Q^2}{r} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^2}$

Примечание:

(для формулы Крагельского И. В.):

для первого этапа, определяющего контактную деформацию: $\Theta = 9 \cdot 10^{-4}$ Н/мм² — упругая постоянная; N — нормальная нагрузка, Н;

для второго этапа, определяющего пластическую деформацию: $H_b = (0,75 - 3)$ мкм — высота волн; $R_b = (10 - 25)$ мкм — радиус волны; $10 \cdot p_a$ — номинальное давление, Н/мм; $r = (r_{np} r_n)^{1/2}$ — радиус кривизны, мкм; $r_n = (4 - 10)$ мкм — среднее значение радиусов кривизны в поперечном сечении; $r_{np} = (10 - 300)$ мкм — среднее значение радиусов кривизны в продольном сечении.

(для формулы Маркова Н. Н.): Q — измерительное усилие инструмента, Н; $R_{ин}$ — радиус измерительного наконечника, мм;

(для формулы Решетова Д. Н.): $\gamma = 0,38 \sqrt{D_{ин}}$ — коэффициент, определяемый из зависимостей начального точечного контакта; $D_{ин}$ — диаметр наконечника, мм;

(для формулы Писаренко Г. С.): $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$ — коэффициент Пуассона материала сжимаемых тел.

наконечников и регистратора в качестве световодов для передачи изображения и измерительного микроскопа для его регистрации соответственно. Работа предназначена, в первую очередь, для трех типов контактирования: наконечника измерительных головок с изделием на координатных измерительных машинах (КИМ), наконечника приборов активного контроля (ПАК) размеров изделий с перемещающимся выступом изделия и наконечника со сторонами впадины резьбы

при контроле ее параметров. В открытой печати исследование данного вопроса во всей его полноте ранее представлено не было, и данная статья направлена на восполнение этого недостатка.

1. Расчетное и фактическое определение деформаций. Известно, что все контактные координатные измерения размеров изделий $l_{изг}$ основаны на фиксации контакта с определением координаты $l_{изм}$ по осям X, Y, Z поверхности изделия за счет небольшого прижима к ней нако-

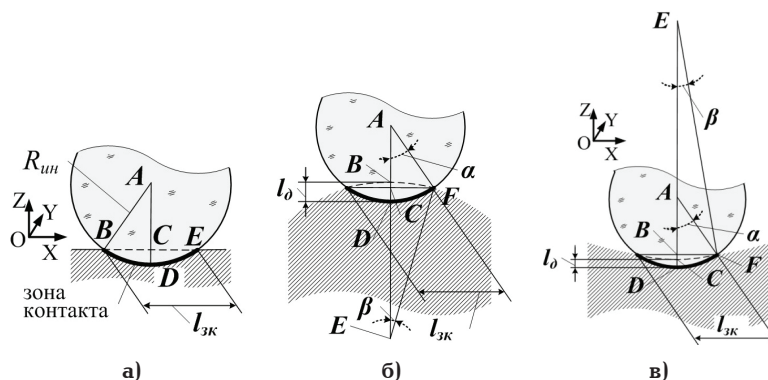


Рис. 2. Образование зоны контакта от контактирования сферического наконечника с плоской (а), выпуклой (б) и вогнутой (в) поверхностями изделий

нечника. Его можно уподобить сферическому индентору, погружаемому с деформациями l_g в тело изделия в зоне контакта и, таким образом, измеренное значение $l_{изм}$ будет содержать эти деформации $l_{изм} = l_{изг} + l_g$ (рис. 1а). Повысить точность измерений можно за счет определения и компенсации возникающих деформаций l_g .

Расчетное значение этих деформаций l_{g1} может быть определено по различным методикам (рис. 1б), наиболее известные из которых разработали Крагельский И. В. [9], Марков Н. Н. [10], Решетов Д. Н. [11], Писаренко Г. С. [12]. Основные формулы для получения расчетного значения l_{g1} приведены в табл. 1.

Однако, в соответствии с этими методиками при одних и тех же условиях, был выявлен разброс значений l_{g1} , связанный с разными подходами авторов к параметрам измеряемых поверхностей [13]. Такой подход хоть и уменьшает l_{g1} , но не полностью ее компенсирует: $l_g - l_{g1} = \delta l_{g1}$. Изменения параметров материалов от температуры, например при контактировании с нагретыми изделиями в ПАК, может приводить к дополнительному увеличению этого разброса. Все это показывает, что область применения подобных методов расчета значений l_g ограничена, не позволяя полностью ее скомпенсировать: $\delta l_{g1} \neq 0$.

В связи с этим предлагается реализовать метод косвенного измерения фактических деформаций l_{g2} (рис. 1в) за счет определения поперечного размера зарегистрированной зоны контакта наконечника с известным радиусом, обеспечивая впоследствии более полную компенсацию $l_g - l_{g2} = \delta l_{g2}$ и более точный результат измерений: $\delta l_{g1} > \delta l_{g2}$. Более подробно особенности такого подхода рассмотрены далее.

2. Возможности определения деформаций при визуализации зоны контакта. Центральным вопросом для предлагаемого способа является возможность визуализации зоны контакта наконечника с изделием. На ее свойства влияют материал наконечников и зависимости размеров зоны контакта от деформаций l_g , которые рассмотрены далее.

2.1. Выбор материала наконечников. В качестве высокопрочных и оптически прозрачных материалов для обеспечения визуализации зоны контакта могут использоваться алмаз, эльбор (бо-

разон, кубонит, кингсонгит, киборит), стишовит, карбид кремния (карборунд, муассанит), фианит, корунды (лейкосапфир, сапфир, рубин), оксинитрид алюминия. Однако самым доступным и широко используемым из них является искусственно получаемый лейкосапфир (Al_2O_3), по твердости (9 по Моосу) уступающий только алмазу, имеющий коэффициент преломления света 1,762–1,778 и температуру плавления 2040 °С.

Устойчивость лейкосапфира к ударным нагрузкам, возникающим в ПАК, подтверждена теоретически и экспериментально [14, 15]. В настоящее время достаточно отработаны технологии изготовления различных сапфировых элементов: от полусфер до высокотехнологичных сапфировых кризондов и/или скальпелей [16].

2.2. Определение размеров зоны контакта при контактировании сферического наконечника с различными типами поверхностей изделий.

Наиболее важным сочетанием форм поверхностей при контактных измерениях является контактирование сферического наконечника с плоской (рис. 2а), выпуклой (рис. 2б) и вогнутой (рис. 2в) поверхностями изделий. При симметричности форм по двум осям зона контакта имеет круглую форму, а при несимметричности, как правило, эллиптическую.

2.2.1. Контакттирование сферического наконечника с плоской поверхностью изделия. В соответствии с теоремой Пифагора и связью между радиусом наконечника — $|AB|=|AD|=R_{шн}$ и, согласно соотношениям сторон в треугольнике ABC (рис. 2а), имеем: упругие деформации — $|CD|=l_g$, хорда (для вида сбоку) или диаметр зона контакта (для вида прямо) $|BE|=l_{зк}$ и $|AC|=|AD|-|CD|=R_{шн}-l_g$. Тогда получаем $R_{шн}^2 = (R_{шн}-l_g)^2 + \frac{l_{зк}^2}{4}$ и, соответственно,

$$l_g = R_{шн} - \sqrt{R_{шн}^2 - \frac{l_{зк}^2}{4}}. \quad (1)$$

График зависимости l_g для данного выражения построена на рис. 3 для $R_{шн}=1,5$ мм при изменении $l_{зк}$ от 30 мкм до 300 мкм.

2.2.2. Контакттирование сферического наконечника с выпуклой поверхностью изделия. Для

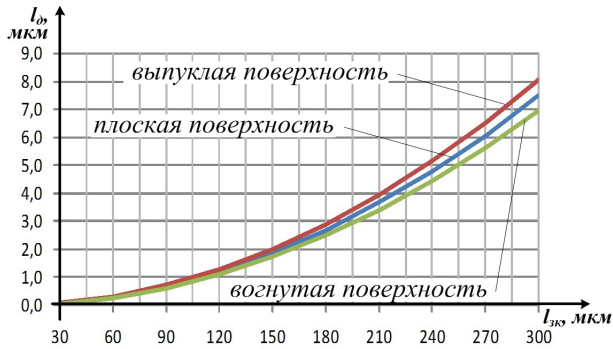


Рис. 3. Зависимости контактных упругих деформаций I_g от размеров зон контакта $I_{зк}$ для трех вариантов контактирования сферического наконечника с плоской, выпуклой и вогнутой поверхностями изделий

данного случая, согласно схеме на рис. 2б, можно сформировать выражение:

$$I_g = |BD| = |BC| + |CD| = R_{узг} - |CE| + R_{ун} - |AC|. \quad (2)$$

Длины отрезков $|CE|$ и $|AC|$ можно определить с помощью углов β и α из треугольников CEF и ACF: $|CE| = R_{узг} \cdot \cos\beta$ и $|AC| = R_{ун} \cdot \cos\alpha$. Значения углов β и α можно определить из других соотношений этих же треугольников: $\frac{I_{зк}}{2R_{узг}} = \sin\beta$ и $\frac{I_{зк}}{2R_{ун}} = \sin\alpha$, откуда получаем $\beta = \arcsin\left(\frac{I_{зк}}{2R_{узг}}\right)$ и $\alpha = \arcsin\left(\frac{I_{зк}}{2R_{ун}}\right)$ соответственно. Объединяя соотношения для разных сторон вышеупомянутых треугольников выражения для длин отрезков $|CE|$ и $|AC|$ с учетом тригонометрического правила $\cos(\arcsin\alpha) = \sqrt{1 - \alpha^2}$ в диапазоне углов $0 \leq \alpha \leq 1$ примут вид:

$$|CE| = R_{узг} \cos\beta = R_{узг} \cos\left(\arcsin\left(\frac{I_{зк}}{2R_{узг}}\right)\right) = R_{узг} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{зк}}{2R_{узг}}\right)^2} = \sqrt{R_{узг}^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}}. \quad (3)$$

$$|AC| = R_{ун} \cos\alpha = R_{ун} \cos\left(\arcsin\left(\frac{I_{зк}}{2R_{ун}}\right)\right) = R_{ун} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{зк}}{2R_{ун}}\right)^2} = \sqrt{R_{ун}^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}}. \quad (4)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в (2), получим искомую формулу:

$$I_g = \left(R_{узг} - \sqrt{R_{узг}^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}}\right) + \left(R_{ун} - \sqrt{R_{ун}^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}}\right). \quad (5)$$

График зависимости I_g для выражения (5) приведен на рис. 3 при изменении $I_{зк}$ от 30 мкм до 300 мкм для следующих параметров: $R_{ун} = 1,5$ мм и $R_{узг} = 20$ мм.

2.2.3. Контактное сферическое наконечника с вогнутой поверхностью изделия. Этот случай основан на следующих соотношениях (рис. 2в):

$$I_g = |CD| = |EA| + |AD| - |EC| = |EA| + R_{ун} - R_{узг}. \quad (6)$$

Длину $|EA|$ можно определить как разницу $|EB|$ и $|AB|$: $|EA| = |EB| - |AB|$ и для каждого из составляющих треугольников EFB и AFB можно записать $|EB| = R_{узг} \cdot \cos\beta$ и $|AB| = R_{ун} \cdot \cos\alpha$ соответственно. Значения углов β и α можно определить из других соотношений этих же треугольников:

$\frac{|BF|}{|EF|} = \frac{I_{зк}}{2R_{узг}} = \sin\alpha$ и $\frac{|BF|}{|AF|} = \frac{I_{зк}}{2R_{ун}} = \sin\beta$ и после преобразований получим: $\alpha = \arcsin\left(\frac{I_{зк}}{2R_{узг}}\right)$ и $\beta = \arcsin\left(\frac{I_{зк}}{2R_{ун}}\right)$. Для соотношений других пар сторон вышеупомянутых треугольников можно записать $\frac{|EB|}{|EF|} = \frac{|EB|}{R_{узг}} = \cos\beta$ и $\frac{|AB|}{|AF|} = \frac{|AB|}{R_{ун}} = \cos\alpha$, откуда с учетом выражений для α и β имеем:

$$|EB| = R_{узг} \cdot \cos\beta = R_{узг} \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{I_{зк}}{2R_{узг}}\right)\right) = R_{узг} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{зк}}{2R_{узг}}\right)^2} = \sqrt{R_{узг}^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}}, \quad (7)$$

$$|AB| = R_{ун} \cdot \cos\alpha = R_{ун} \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{I_{зк}}{2R_{ун}}\right)\right) = R_{ун} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{зк}}{2R_{ун}}\right)^2} = \sqrt{R_{ун}^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}}. \quad (8)$$

Подставляя выражения (7) и (8) в (6), получим искомую формулу:

$$I_g = \sqrt{R_{узг}^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}} - \sqrt{R_{ун}^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}} + R_{ун} - R_{узг} = \left(R_{ун} - \sqrt{R_{ун}^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}}\right) - \left(R_{узг} - \sqrt{R_{узг}^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}}\right). \quad (9)$$

На рис. 3 также построен график зависимости I_g , согласно выражению (9), при изменении $I_{зк}$ от 30 мкм до 300 мкм для $R_{ун} = 1,5$ мм и $R_{узг} = 20$ мм.

Как видно на рис. 3, для трех построенных вышеупомянутых зависимостей и значения $I_{кл} \approx 105$ мкм получаются достаточно близкие значения $I_g \approx 1$ мкм.

3. Экспериментальное моделирование процессов образования, визуализации, видеорегистрации и измерения размеров зоны контакта.

Апробирование предлагаемых идей было сделано на экспериментальной установке, основу которой составили круглое упругое изделие 1, стеклянные пластины 2 с плоской и выпуклой поверхностями, регистратор 3 (рис. 4а).

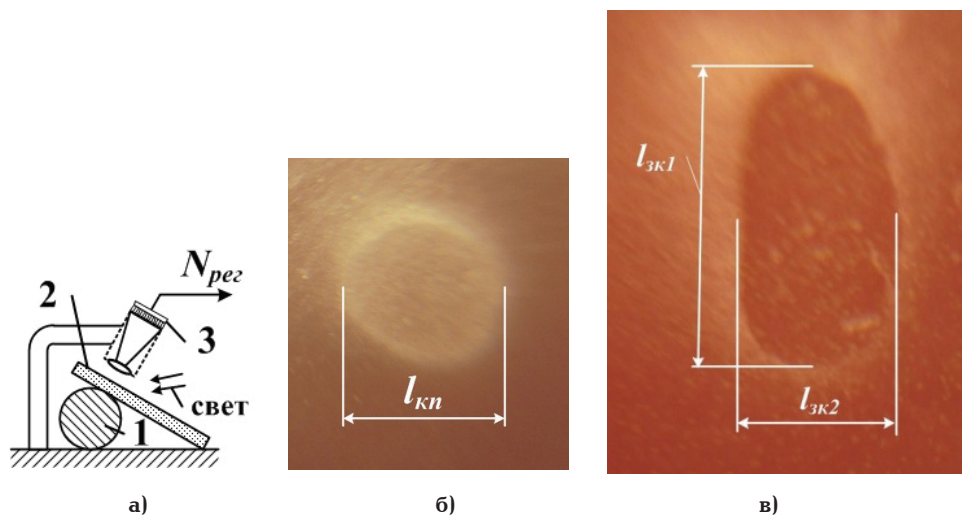


Рис. 4. Видеорегистрация зоны контакта: схема установки (а), изображения круглой (б) и эллиптической (б) зон контакта

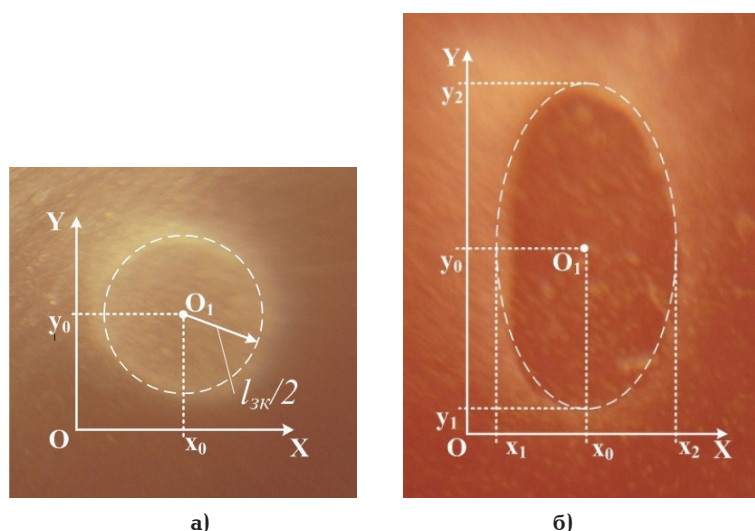


Рис. 5. Определение центра круга (а) и эллипса (б)

Стеклопластина 2, придавливая одним своим концом боковую поверхность упругого круглого изделия 2, вызывает ее небольшое сплющивание и появление зоны контакта. Боковой свет, проходя через прозрачную стеклянную пластину 2, освещает зону контакта для ее видеофиксации регистратором 3. Зоны контакта имеют круглую (рис. 4б) и эллиптическую (рис. 4в) формы при контактировании круглого изделия 1 со стеклянной пластиной 2 с плоской и выпуклой поверхностями соответственно. На полученных фотографиях четко видны светлые границы зоны контакта. Вероятно, эта светлая кромка включает в себя одно из колец Ньютона, формируемого при некогерентном освещении лампой накаливания с широким спектром излучения. Число колец Ньютона должно быть больше при освещении когерентным светом. При этом момент появления колец Ньютона соответствует началу касания наконечника с изделием.

4. Определение центра зоны контакта. Видеорегистрация зоны контакта одновременно позволяет решить и смежную задачу, недостижимую

непрозрачным наконечникам и связанную с определением её центра $O_1(x_0; y_0)$. Определение координат x_0 и y_0 искомого центра O_1 зоны контакта позволяет определить направление движения и точки касания наконечника с изделием в заданной системе координат XYZ измерительного устройства.

Особенность этого процесса заключается в идентификации формы зоны контакта с помощью различных компьютерных алгоритмов обработки изображений, например, основанных на методе наименьших квадратов. Как следует из вышесказанного, самыми распространенными такими формами могут быть: круг (рис. 5а) —

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \left(\frac{l_{зк}}{2}\right)^2 \text{ или эллипс (рис. 5б) — } \left(\frac{2(x - x_0)}{x_2 - x_1}\right)^2 + \left(\frac{2(y - y_0)}{y_2 - y_1}\right)^2 = 1.$$

5. Требования к проектированию оптико-электронных элементов для различных типов контактирования. На основе особенностей контактирования наконечника в КИМ, ПАК и при

контроле параметров резьбы можно сформировать требования, предъявляемые к соответствующим конструкциям наконечников с возможностями регистрации зоны контакта для последующего использования при их проектировании.

5.1. Контакттирование наконечников измерительных головок с изделием на КИМ. Данной отличительной особенностью является необходимость сочетания таких противоречивых требований, как широкое поле обзора $\pm 90^\circ$ (по двум осям), соответствующее сверхширокоугольному объективу типа «fish-eye» с необходимостью высокой разрешающей способности определения размеров зоны контакта, на уровне не хуже 1–5 мкм.

5.2. Контакттирование наконечника ПАК с перемещающимся выступом изделия. Важной особенностью данного применения является необходимость при определенных условиях сочетания высокого быстродействия при регистрации зоны контакта, перемещающегося со скоростью $\approx 0,6$ м/с, и малой ширины зоны контакта ≈ 100 –500 мкм для острых кромок режущего инструмента.

5.3. Контакттирование наконечника со сторонами впадины резьбы. Особенность данного применения заключается в необходимости контактирования с двумя сторонами впадины резьбы с формированием двух зон контакта наконечника. При этом для определения центра зоны контакта каждая из сторон такого наконечника должна иметь бочкообразность с радиусом не менее 100...200 мм.

6. Возможности повышения качества видеорегистрации изображений зоны контакта. Повышение качества видеорегистрации изображений может быть обеспечено поворотом матрицы регистратора и компьютерной обработкой изображений зоны контакта, рассмотренных далее.

6.1. Поворот матрицы регистратора. Уменьшение искажений «смаза» при регистрации изображений быстро перемещающихся изделий возможно при использовании технологии временной задержки накопления (технология «e2v») [17] за счет обеспечения сонаправленности строк пикселей регистратора с касательной изображений частей изделия. Например, поворот ПЗС-матрицы регистратора осуществляется до совпадения строк пикселей с направлением режущих кромок сверл или фрез, как описано в [18].

6.2. Компьютерная обработка изображений зоны контакта. Точность определения размеров зоны контакта и положения её центра напрямую связано с качеством изображения, прошедшего через материал наконечника и преобразованного регистратором. Одно из направлений повышения точности связано с применением методов субпиксельной обработки изображений, подобных рассмотренным в [19–20].

Другое направление связано с корректировкой изображений, искаженных по разным причинам, а именно от возможного наличия различных включений в сапфир, влияющих на светопропускание наконечника, изменения чувствительности пикселей, смаза изображения от движений наконечника и/или изделия, влиянием шумов: внутреннего и импульсного, вызванного сбоем в работе сенсоров ПЗС-матрицы

или их выхода из строя (появление «битых пикселей»), гауссова — из-за шума в электронных цепях и других причин, и т.п.

Поэтому восстановление изображений с ухудшенным качеством по вышеуказанным причинам математико-компьютерными методами становится неотъемлемым этапом единого процесса измерений. Как правило, для подобных корректировок используются одномерные интегральные уравнения Вольтерра I рода [21–23]:

$$(1/\Delta) \int_x^{x+\Delta} w_y(\xi) d\xi = g_y(x) + \delta g, \\ a \leq x \leq b, \quad c \leq y \leq d; \quad (10)$$

Фредгольма I рода типа свертки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(x-\xi) w_y(\xi) d\xi = g_y(x) + \delta g, \\ a \leq x \leq b, \quad c \leq y \leq d \quad (11)$$

или двумерные интегральные уравнения Фредгольма I рода типа свертки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x-\xi, y-\eta) w(\xi, \eta) d\xi d\eta = g(x, y) + \delta g, \\ a \leq x \leq b, \quad c \leq y \leq d, \quad (12)$$

где Δ — величина смаза, h — функция рассеяния точки, определяющая характер искажения точек изображения, w и g — распределение интенсивности по неискаженному и искаженному изображению соответственно, δg — шум.

Для использования в процессе реконструкции смазанных изображений разработаны методики, основанные на методе преобразований Фурье или квадратур с использованием метода регуляризации Тихонова в сочетании со способом «усечение — размытие — поворот», включая быстрые алгоритмы восстановления смазанных изображений [21].

Время реализации одного из них при скорости компьютера ~ 1 млрд оп/с заняло всего $\sim 0,1$ с. Согласно таким методам удается повысить разрешающую способность до 3-х раз. При координатных измерениях размеров изделий на КИМ и контроле параметров резьбы вышеупомянутые алгоритмы могут использоваться в режиме **online**, а для ПАК с быстропротекающими процессами вращения и обработки изделия — один раз на серию подобно стробоскопу.

Заключение.

1. Повышение точности контактных измерений может быть достигнуто за счет изготовления наконечника из высокопрочных и оптически прозрачных материалов и использования измерительного микроскопа и, соответственно, визуализации зоны контакта наконечника с изделием, измерением ее размера, определения деформаций l_g с компенсацией их из результата измерений.

2. Для большинства случаев значение деформаций l_g может быть рассчитано при измерении размеров зоны контакта, образующейся в результате трех основных вариантов контактирования: сфера — плоскость и сфера — сфера (снаружи или внутри) и, в частности, для сферического нако-

нечника с изделиями с плоской и сферической (выпуклой или вогнутой) поверхностями.

3. Дополнительной функциональной возможностью является определение координат центра зоны контакта в текущем режиме (режиме on-line), которое в итоге позволит получить информацию о координатах точки контакта и направлении движения наконечника в пределах глубины погружения после начала контактирования с изделием.

4. Повышение точности измерений упругих деформаций определяется характеристиками видеорегистрации изображений зоны контакта, которые могут быть улучшены с применением методов субпиксельной обработки изображений, поворотом матрицы регистратора до совпадения строк пикселей с направлением режущих кромок сверл и/или фрез и компьютерной обработки изображений зоны контакта. Использование последнего уменьшает влияние таких составляющих, как смаз, от движений наконечника относительно изделия, изменения чувствительности пикселей, влияния шумов: внутреннего и импульсного, вызванного сбоем в работе сенсоров ПЗС-матрицы или их выхода из строя (появление «битых пикселей»), гауссова — из-за шума в электронных цепях.

Библиографический список

1. Гапшис А. А., Каспарайтис А. Ю., Модестов М. Б. [и др.]. Координатные измерительные машины и их применение. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.

2. Леун В. И., Николаева Е. В. Метрологический прямой метод измерения среднего диаметра резьб режущего и контрольного инструментов на операции резьбошлифования // СТИН. 2014. № 3. С. 37–38.

3. Леун В. И., Николаева Е. В. Метрологические и конструктивные особенности принципов построения приборов активного контроля размеров средних диаметров резьбы на операциях резьбошлифования // СТИН. 2014. № 10. Р. 39–40.

4. Кувадина А. А., Пимнева Н. Е., Николаева Е. В. Измерения резьбовых деталей, зубчатых колес и шестерен на координатно-измерительных машинах // Метрология, стандартизация и управление качеством: материалы II Всерос. науч.-техн. конф., 19–21 апреля 2017 г. / ОмГТУ. Омск, 2017. С. 32–33. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

5. Носкова Ю. Ю., Халтурин О. А., Абляз Т. Р. Метод контроля конических резьб для элементов бурльных колонн на координатно-измерительной машине // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 10. С. 6–10.

6. Леун Е. В. Гибридная 3D измерительная головка для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий сложной формы // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 140–146.

7. Леун Е. В. Вопросы построения многоканальных гибридных 3D измерительных головок для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий // Омский научный вестник. 2017. № 6 (156). С. 126–131.

8. Leun E. V., Leun V. I., Sysoev V. K., Zanin K. A., Shulepov A. V., Vyatlev P. A. The active control devices of the size of products based on sapphire measuring tips with three degrees of freedom // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 944. 012073. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012073.

9. Крагельский И. В. Трение, изнашивание и смазка. В 2 т. / под ред. И. В. Крагельского. М.: Машиностроение. 1978. Т. 1. 400 с.

10. Марков Н. Н. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях / под ред. Н. Н. Маркова. М.: Машиностроение, 1967. 392 с.

11. Решетов Д. Н. Детали и машины металлорежущих станков. В 2 т. / под ред. Д. Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1972. Т. 1. 664 с.

12. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / под ред. Г. С. Писаренко. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.

13. Николаева Е. В. Повышение точности и производительности резьбошлифования на основе разработанных метода и средств для измерения параметров наружных резьб: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2006. 139 с.

14. Леун Е. В. Разработка приборов активного контроля размерных параметров изделий с использованием сапфировых измерительных наконечников // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 123–127.

15. Леун Е. В., Леун В. И., Савенков В. А., Курлов В. Н., Никель А. В. Вопросы построения телескопических приборов активного контроля размеров изделий с корундовыми наконечниками // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 2. С. 29–37. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-2-29-37.

16. Шихунова И. А., Курлов В. Н., Стрюков Д. О. [и др.]. Новые медицинские лазерно-волоконные приборы и инструменты на основе профилированных кристаллов сапфира // Актуальные проблемы физики конденсированного состояния: сб. ст. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2015. С. 31–46. ISBN 978-5-7691-2418-1.

17. Петрошенко М., Соломицкий Д. Технологии компании e2v // Компоненты и технологии. 2012. № 11. С. 80–85. URL: http://www.npk-photonica.ru/images/tehnologii_e2v.pdf (дата обращения: 19.02.2019).

18. Leun E. V., Leun V. I., Sysoev V. K., Zanin K. A., Shulepov A. V., Vyatlev P. A. The active control devices of the size of products based on sapphire measuring tips with three degrees of freedom // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 944. 012073. DOI:10.1088/1742-6596/944/1/012073.

19. Кавиева Е. С. Методы и алгоритмы субпиксельной обработки цифровых изображений: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 126 с.

20. Резник А. Л. Методы, алгоритмы и программы для ускоренного решения трудоемких задач обработки случайных дискретных полей и цифровых изображений: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2004. 241 с.

21. Сизиков В. С., Кирьянов К. А. Два быстрых алгоритма восстановления смазанных изображений // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 10. С. 24–30.

22. Sizikov V. S., Ekzempliarov R. A. Operating sequence when noise is being filtered on distorted images // Journal of Optical Technology. 2013. Vol. 80 (1). Р. 28–34. DOI: 10.1364/JOT.80.000028.

23. Rimskikh M. V., Evseev V. O., Sizikov V. S. Reconstruction of smeared images by various methods // Journal of Optical Technology. 2007. Vol. 74 (11). P 764–768. DOI: 10.1364/JOT.74.000764.

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», Московская область, г. Химки.

SPIN-код: 6060-8056
AuthorID (РИНЦ): 367560
AuthorID (SCOPUS): 57200722184

ШАХАНОВ Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, начальник отдела АО «НПО Лавочкина», Московская область, г. Химки.

НИКЕЛЬ Андрей Викторович, инженер, участок ТЧЭ № 2, ОАО «РЖД», Западно-Сибирская железная дорога, г. Омск.

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В., Шаханов А. Е., Никель А. В. Возможности повышения точности контактных измерений при использовании корундовых наконечников и видеорегистрации изображения области контакта // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 68–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-68-75.

Статья поступила в редакцию 18.02.2019 г.

© Е. В. Леун, А. Е. Шаханов, А. В. Никель