

4. Фот А. П., Чепасов В. И., Муллабаев А. А. Проектирование наборов плоскопараллельных концевых мер с учетом комплексного критерия оптимизации // Интеллектуальные системы в производстве. 2012. № 1. С. 138—145.

5. Фот А. П., Чепасов В. И. О способах оптимизации наборов плоскопараллельных концевых мер // Законодательная и прикладная метрология. 2012. № 5. С. 25—30.

6. Муллабаев А. А., Фот А. П. Оптимизация наборов концевых мер // Вестник Оренбург. гос. ун-та. 2005. № 4. С. 156—158.

7. Муллабаев А. А., Фот А. П., Павлов С. И. Об использовании математического моделирования в некоторых задачах машиностроения // Вестник Оренбург. гос. ун-та. 2006. № 2. С. 75—82.

8. Свид. об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2009611695 «Метод половинного шага в решении оптимизационных задач механики» / А. А. Муллабаев и др. (RU) // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. 2009. № 2. С. 399.

9. Свид. об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2009614644 «Программа по получению массива калиброванных размеров» / В. И. Чепасов, А. П. Фот, А. А. Муллабаев (RU) // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. 2010. № 4. С. 262—263.

10. Чепасов В. И., Муллабаев А. А., Фот А. П. Программный комплекс по построению и оптимизации массива калиброванных размеров: Монография. М.: Руссервис, 2010.

11. Чепасов В. И., Муллабаев А. А., Фот А. П. Генерация калиброванных размеров исходного набора // Вестник Оренбург. гос. ун-та. 2010. № 1. С. 154—151.

12. Чепасов В. И., Муллабаев А. А., Фот А. П. Оптимизация количества калиброванных размеров // Вестник Оренбург. гос. ун-та. 2010. № 2. С. 168—171.

13. Чепасов В. И., Муллабаев А. А., Фот А. П. Генерация калиброванных размеров с использованием регрессионных ограничений // Вестник Оренбург. гос. ун-та. 2011. № 4. С. 179—185.

Дата принятия 13.05.2013 г.

621.00.56

## Исследование влияния температурных деформаций на точность линейных измерений

О. С. БАШЕВСКАЯ\*, С. В. БУШУЕВ\*, Ю. В. ПОДУРАЕВ\*, М. Г. КОВАЛЬСКИЙ\*\*, Г. Б. КАЙНЕР\*\*, Е. В. РОМАШ\*

\* Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия,  
e-mail: bashevskaya@yandex.ru

\*\* ОАО «НИИИзмерения», Москва, Россия

*Рассмотрено влияние температурных деформаций конструктивных элементов измерительных систем на процесс контроля прецизионных деталей. Предложен и опробован метод определения температурной деформации измерительной стойки, который можно применить к приборам, используемым для линейных измерений в нанометровом диапазоне.*

**Ключевые слова:** линейный размер, нанометровый диапазон, температурные деформации.

*The influence of temperature deformation of construction elements of measuring instruments on the high-precision components control process is considered. A method of determination of measuring stand temperature deformation is suggested and tested. This method is applicable to the instruments used for linear measurements in nanometer range.*

**Key words:** linear size, nanometer range, temperature deformations.

На погрешность линейных измерений существенное влияние оказывают изменения температуры окружающей среды, вызывающие температурные деформации (ТД) объекта измерений, механических звеньев и соединений используемой измерительной системы (ИС) [1]. Ранее при определении температурных погрешностей измерений предполагали одинаковым воздействие температуры на элементы ИС и объект измерений. Развитие нанотехнологий обусловило необходимость продолжения исследований в этой области, направленных на обеспечение единства измерений в нанометровом диапазоне 1—100 нм согласно [2]. В последнее время опубликованы результаты исследований, касающиеся определения погрешностей, вызванных ТД объектов измерений, измерительных приборов и используемых установочных мер длины [3—5]. Целью дальнейших исследований, обобщенные результаты которых приведены в данной ста-

тье, является разработка и экспериментальная проверка эффективности методики определения ТД важного элемента ИС — измерительной стойки, предназначенной для крепления датчиков линейных перемещений или измерительных приборов с такими датчиками.

Современное поколение ИС, предназначенных для измерений в микро- и нанодиапазонах, отличается рядом конструктивных особенностей [6—10], в частности, сложной пространственной конфигурацией измерительной стойки с закрепленным на ней средством измерений, влияющей на ТД в реальных эксплуатационных условиях. Измерительные стойки состоят из нескольких связанных элементов разных форм, габаритных размеров и изготовленных из различных материалов. Например, использованная в эксперименте стойка имеет С-образную форму и состоит из нескольких частей.

Существенные отличия конструкций, геометрических форм и размеров, физико-механических свойств материалов составных частей ИС, а также сложность их соединений приводят к неоднородности и анизотропии температурных полей. Вследствие этого ТД могут быть разнонаправленными и отличаться в разных точках рабочей зоны. Следует подчеркнуть, что температурные поля имеют нестационарный характер, а переходные процессы зависят не только от термодинамических свойств элементов системы, но и от внешних возмущающих воздействий. Указанные характерные свойства температурных полей создают проблему построения адекватных математических моделей при проектировании ИС, особенно разрабатываемых для измерений в нанометровом диапазоне.

Для оценки эффективности применения указанных ИС в реальных производственных условиях предложено ТД их составных частей свести к точке соприкосновения щупа датчика линейных перемещений с измеряемым объектом. Таким образом, получаем интегральную оценку ТД системы в целом, хотя источники возникших деформаций распределены по составляющим ее механическим звеньям и конструктивным соединениям. Отметим, что зависящий от многих факторов вклад каждого звена в суммарную деформацию системы не является предметом данного исследования.

Разработанный экспериментально-аналитический метод можно использовать для определения ТД как различных ИС, так и разных объектов измерений. Если в качестве объекта измерений использовать такой, у которого температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), по крайней мере, на порядок меньше ТКЛР элементов ИС, то влиянием этого объекта на ТД системы в целом можно пренебречь. В проведенных экспериментах в качестве объекта измерения взята концевая мера длины (КМД) из кварцевого стекла, ТКЛР которого равен  $1 \cdot 10^{-6}$ , тогда как ТКЛР стали составляет  $(10-17) \cdot 10^{-6}$ .

Экспериментальные исследования проводили в лаборатории МГТУ «СТАНКИН». Использовали измерительную стойку ИКПВ и прибор БВ-6463-02 с двумя индуктивными датчиками линейных перемещений, цифровым и шкальным индикаторами, климатическую камеру МНВ-225 CLSA и концевую кварцевую меру длины 90 мм. В качестве объекта для определения ТД была выбрана измерительная стойка ИКПВ, широко используемая в метрологических лабораториях: ее вертикальная колонка жестко зафиксирована на основании, на ней крепится кронштейн с индуктивным датчиком и столик с кварцевой мерой. В аттестованную климатическую камеру, имеющую погрешность поддержания температуры  $\pm 0,3$  °С, для создания стабильных температурных условий размещали стойку, прибор и кварцевую меру.

Основные метрологические характеристики индуктивных датчиков прибора БВ-6463-02: диапазон измерений  $\pm 20$  мкм, дискретность отсчета 0,01 мкм, предел допускаемой основной погрешности 0,05 мкм.

Чтобы убедиться в возможности исключения погрешности прибора БВ-6463-02 была выполнена проверка его стабильности. Для этого прибор с закрепленным в металлической втулке датчиком помещали на длительный период в климатическую камеру с температурой 20 °С, установив на индикаторе датчика нулевое значение. Как показало тестирование, изменения показаний прибора не превышали дискретности отсчета 0,01—0,02 мкм, т. е. показания практически оставались неизменными в течение 8 ч.

Методика проведения экспериментов по исследованию ТД основана на определении линейных деформаций стойки при различных температурах в климатической камере. Температуру в камере задавали с шагом 1 °С в диапазоне 18—22 °С, что соответствует нормальным условиям проведения линейных измерений по [11].

Изменение положения точки соприкосновения щупа датчика линейных перемещений с концевой мерой, по которому оценивали деформацию стойки, определяли по показаниям прибора БВ-6463-02, регистрируемым с периодом  $t = 30$  мин.

На рис. 1 для каждого значения температуры, воспроизводимой климатической камерой, явно выражены две характерные зоны, отражающие изменение ТД измерительной стойки. Первая зона характеризует возникающие в системе тепловые инерционные процессы, протекающие при скачкообразном изменении температуры в камере. На этой части графика переходные процессы во времени отображены в виде стандартных экспоненциальных функций. Вторая зона — участок стабильных значений, который включает 3—4 экспериментальные точки по принятой методике. В период стабильности различие в показаниях измерительного прибора не превышает 0,02—0,06 мкм, что свидетельствует о практическом постоянстве ТД исследуемой измерительной стойки.

В дальнейшем при математическом моделировании температурных процессов для периода стабильности каждое значение температуры в климатической камере будем характеризовать средним значением  $Y$  показаний прибора, соответствующим среднему измеренному значению ТД:

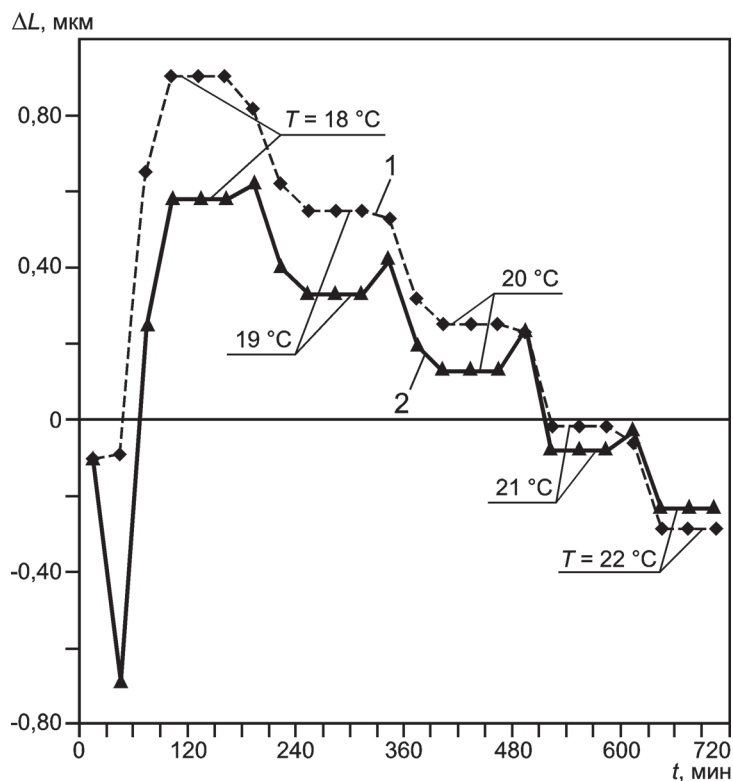


Рис. 1. Зависимость температурной деформации  $\Delta L$  измерительной стойки от времени воздействия  $t$  при изменении температуры  $T$  климатической камеры:

1, 2 — с использованием датчиков 1, 2, соответственно

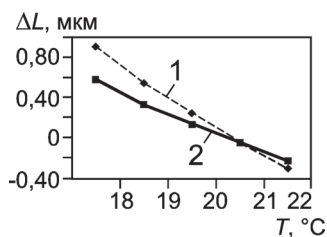


Рис. 2. График температурной деформации для датчиков 1 и 2

$$Y = \sum_m \Delta L_m / M, \quad (1)$$

где  $\Delta L_m$  — показания измерительного прибора в точке  $m$ ;  $M$  — общее количество экспериментальных точек для периода стабильности при данном значении температуры, воспроизводимой в климатической камере.

На основании рассчитанных средних значений по-

казаний измерительного прибора, визуализирующего сигналы от двух индуктивных датчиков, построены зависимости, приведенные на рис. 2. Далее при определении коэффициента ТД стойки использовали график с наибольшим наклоном (кривая 1).

Экспериментальные данные обрабатывали методом наименьших квадратов (МНК), который широко применяется для построения регрессионных моделей. Для обработки экспериментально полученной зависимости показаний измерительного прибора (по средним арифметическим значениям) от температуры в климатической камере (см. рис. 2) взят случай линейной регрессии. Линейная модель представлена в стандартном виде

$$Y = AX + B, \quad (2)$$

где  $X$  — значение температуры в климатической камере;  $A, B$  — параметры линейной модели.

Для компьютерного расчета использовали вычислительный on-line ресурс [12], реализующий МНК для линейной модели. В результате получены следующие параметры:  $A = -0,29$ ,  $B = +6,232$ . Проверку значимости полученной регрессионной модели проводили по критерию Фишера согласно уравнению

$$F = R^2 f_2 / [(1 - R^2) f_1],$$

где  $R$  — коэффициент корреляции;  $f_1, f_2$  — число степеней свободы соответственно объясненной и необъясненной дисперсий.

В рассматриваемой линейной модели вида (1) получены  $R = 0,998$  и  $F = 731,9$ . Для проверки значимости уравнения регрессии вычисленное значение  $F$  сравнили с табличным  $F^* = 10,13$ , взятым для числа степеней свободы  $f_1 = 1, f_2 = 3$  при выбранном уровне значимости 0,05. Так как  $F \gg F^*$ , следовательно, объясненная дисперсия существенно больше необъясненной, и построенная линейная модель является значимой. При этом условие линейности хорошо выполняется.

На основании построенной линейной математической модели коэффициент ТД измерительной стойки выражается формулой  $K_T = |A|$ . По результатам эксперимента  $K_T = 0,298$  мкм/°С. Полученный коэффициент ТД позволяет оценить температурные погрешности ИС при изменении температуры в заданном диапазоне.

Предложенный экспериментально-аналитический метод определения ТД можно успешно использовать для оценки деформаций механических частей просвечивающих, сканирующих, атомно-силовых и других видов микроскопов, используемых для линейных измерений в нанометровом диапазоне.

В работе использованы результаты исследований, выполненных на оборудовании и при поддержке центра коллективного пользования государственного инженерингового центра при МГТУ «СТАНКИН».

#### Литература

1. **Марков Н. Н., Сацердотов П. А.** Погрешности от температурных деформаций при линейных измерениях. М.: Машиностроение, 1976.

2. **ГОСТ 8.592—2009.** ГСИ. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления.

3. **Кайнер Г. Б.** Совершенствование метрологического обеспечения технологий обработки прецизионных деталей в нанометровом диапазоне // Измерительная техника. 2007. № 8. С. 22—27; **Kainer G. B.** Improvement in metrological provision for processing technology of precision components in the nanometer range // Measurement techniques. 2007. V. 50. N 8. P. 833—840.

4. **Кайнер Г. Б.** Новые методы оценки деформаций при измерении линейных параметров прецизионных деталей в нанометровом диапазоне // Измерительная техника. 2008. № 12. С. 6—10; **Kainer G. B.** New methods for estimating deformations in measurement of the linear parameters of precision parts in the nanometric range // Measurement techniques. 2008. V. 51. N 12. P. 1262—1268.

5. **Кайнер Г. Б.** Выбор и назначение методов и средств измерений прецизионных деталей // Измерительная техника. 2007. № 7. С. 11—17; **Kainer G. B.** Choice and designation of methods and measurement provisions for precision components // Measurement techniques. 2007. V. 50. N 12. P. 1252—1260.

6. **Башевская О. С., Кайнер Г. Б., Ромаш Е. В.** Комплексная оценка тепловизионным методом состояния доведенных поверхностей в машиностроении // Контроль. Диагностика. 2012. № 12. С. 36—42.

7. **Игнатьев П. С. и др.** Применение интерференционной микроскопии для анализа микро- и нанорельефа и дефектов поверхностей крупногабаритных деталей в различных отраслях промышленности // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. Т. 2. № 4. С. 150—155.

8. **Григорьев С. Н.** Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 3. С. 7—13.

9. **Григорьев С. Н. и др.** Контроль параметров процесса резания на основе диагностирования инструмента и заготовки // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 46—48; **Grigoriev S. N. e. a.** Control of parameters of the cutting process on the basis of diagnostics of the machine tool and workpiece // Measurement techniques. 2012. V. 55. N 5. P. 555—558.

10. **Grigoriev S. N. e. a.** Diagnostic systems as basis for technological improvement // Proc. CIRP: Fifth Cirp.Conf. High Performance Cutting 2012/ Wegener K. 2012. V. 1. P. 599—604.

11. **ГОСТ 8.050—73.** ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений.

12. **Факультет пищевых и химических производств Алтайского государственного технического университета им. И. И. Покрунова.** Он-лайн расчет линейной регрессии методом наименьших квадратов [Официальный сайт] <http://www.chem-astu.ru/science/lsq/> (дата обращения 20.04.2013 г.).

Дата принятия 27.06.2013 г.