

4. Лапко А. В., Лапко В. А. Коллектив непараметрических решающих функций в двальтернативной задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2009. Т. 37. № 3. С. 156—160.

5. Лапко А. В., Лапко В. А. Разработка и исследование двухуровневых непараметрических систем классификации // Автометрия. 2010. Т. 46. № 1. С. 70—78.

6. Lapko A. V., Lapko V. A. Development and Investigation of Two-Level Non-Parametric Estimators // Opt., Instrument. Data Proces. 2010. Т. 46. N. 1. P. 56—63.

7. Лапко А. В., Лапко В. А. Синтез структуры семейства непараметрических решающих функций в задаче распознавания образов // Автометрия. 2011. Т. 47. № 4. С. 76—82.

8. Lapko A. V., Lapko V. A. Synthesis of the Structure of a Family of Nonparametric Decision Functions in the Pattern Recognition Problem // Opt., Instrument. Data Proces. 2011. Т. 47. N. 4. P. 383—387.

9. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические методики анализа множеств случайных величин // Автометрия. 2003. Т. 39. № 1. С. 54—61.

10. Lapko A. V., Lapko V. A. Non-parametric Analysis Techniques of Random Values sets // Opt., Instrument. Data Proces. 2003. Т. 39. N. 1. P. 44—50.

11. Лапко А. В., Лапко В. А. Регрессионная оценка плотности вероятности и ее свойства // Системы управления и информационные технологии. 2012. Т. 49. № 3. С. 152—156.

12. Лапко А. В., Лапко В. А. Оптимальный выбор количества интервалов дискретизации области изменения одномерной случайной величины при оценивании плотности вероятности // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 24—27; Lapko A. V., Lapko V. A. Optimal selection of the number of sampling intervals in domain of variation of a one-dimensional random variable in estimation of the probability density // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 7. P. 763—767.

13. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применения. 1969. Т. 14. № 1. С. 156—161.

Дата принятия 30.12.2013 г.

НАНОМЕТРОЛОГИЯ

621.00.56

Разработка экспериментально-аналитической методики определения температурных деформаций концевых мер длины в нанометровом диапазоне

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

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

** ОАО «НИИИзмерения», Москва, Россия, e-mail: kovalskiy@micron.ru

Рассмотрено влияние температурных деформаций концевых мер длины на процесс контроля прецизионных деталей. Предложена и экспериментально апробирована экспериментально-аналитическая методика определения температурных деформаций концевых мер длины, используемая при проведении линейных измерений в нанометровом диапазоне.

Ключевые слова: температурные деформации, концевые меры длины, нанометровый диапазон.

The influence of thermal strains of end standards of meter on the precision elements control process is considered. The experimental-analytical procedure of determination of end standards of meter temperature deformations used at linear nanoscale measurements is suggested and tested experimentally.

Key words: temperature deformations, end standards of meter, nanometer range.

При контроле прецизионных деталей в нанометровом диапазоне методом сравнения, а также для поверки и калибровки средств измерений (СИ) геометрических параметров широко используют концевые меры длины (КМД). При воспроизведении длины КМД обеспечивают идентичность

условий и состояний этого процесса, идентичность внутренних напряжений и нанодеформаций [1, 2]. Развитие нанотехнологий доказывает необходимость продолжения исследований, направленных на обеспечение единства измерений в нанометровом диапазоне 1—100 нм [3, 4].

Известно, что погрешности измерений складываются из большого числа составляющих, причем основные из них — погрешности СИ, установочных мер и объектов измерений. Погрешность установочных мер может быть частью погрешности СИ или рассмотрена как отдельная составляющая, если используют стандартные плоскопараллельные КМД. Температурная погрешность всегда присутствует при измерениях.

Она обусловлена тем, что температурное поле системы «измерительный прибор — объект измерения» имеет сложный пространственный и временной характер, что и предопределяет различие процессов деформации в элементах системы, имеющих разные коэффициенты линейного расширения и различную температуру, которая может варьироваться для разных пространственных сечений и поверхностей.

Современные требования к повышению точности линейных измерений не позволяют использовать применяемую ранее методику оценки температурной погрешности рассматриваемой системы «измерительный прибор — объект измерения», основанную на предположении, что все части измерительного прибора имеют одинаковую, постоянную по объему и стационарную во времени температуру, а ее воздействие на элементы измерительной системы и на измеряемый объект — одинаково [3].

Для определения температурной погрешности измерений, возникающей вследствие разницы температурных коэффициентов линейного расширения материалов (ТКЛР) деталей измерительных приборов, используемых КМД и измеряемых объектов, необходимо оценить влияние на эту погрешность их температурных деформаций, определив характер распределения температурных полей в реальных условиях.

Проблема разработки методик для измерения деталей в нанометровом диапазоне и объективной оценки ТКЛР мер длины является актуальной для метрологического обеспечения линейных измерений.

На процесс измерений прецизионных деталей оказывает существенное влияние совокупность факторов, определяющих температурные деформации в системе «СИ — КМД» [3], [5—7]. Одним из важных факторов, влияющих на процесс контроля, являются температурные деформации измерительных стоек, экспериментально-аналитический метод оценки влияния которых приведен в [5].

Цель дальнейших исследований — разработка экспериментально-аналитической методики определения дифференцированной оценки вклада составляющей, обусловленной температурными деформациями КМД, в суммарную температурную погрешность системы «СИ — КМД».

В качестве объекта для определения характера распределения температурных полей выбрали КМД разной длины со значениями 1; 5; 10; 100 мм, которые при соблюдении нормальных условий проведения линейных измерений размещали на столике измерительной стойки контактного вертикального интерферометра (ИКПВ) [8].

Для визуализации и измерений температурных полей использовали компьютерный термограф «Иртис-2000СВ», позволяющий определять бесконтактным методом абсолют-

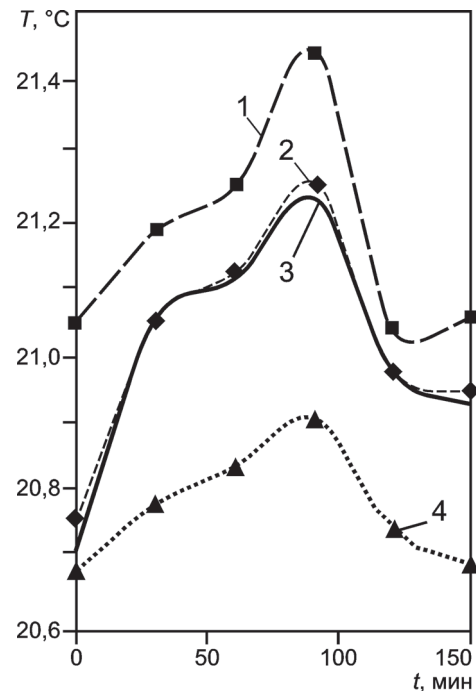


Рис. 1. Распределение температуры в зависимости от размера концевых мер длины

1, 2, 3, 4, соответственно 1, 100, 10, 5 мм

ные значения температуры и обладающий чувствительностью 0,05 °C при 30 °C. Основным преимуществом бесконтактного метода является то, что он относится к средствам неразрушающего контроля, когда сигналы от инфракрасных (ИК) датчиков, расположенных в непосредственной близости от исследуемого объекта и фиксирующих ИК-излучение, поступают в компьютер для их дальнейшего анализа. Отсутствие прямого контакта с исследуемым объектом не изменяет его температурных и электрических характеристик, отражая правдоподобную картину происходящих явлений.

Проведенные многократные экспериментальные исследования реальных температурных полей КМД (рис. 1) свидетельствуют о их нестационарности во времени. Температурные поля исследуемых КМД характеризуются разбросом температур в диапазоне 20,65 — 21,49 °C. Последующие измерения температурных полей стойки, кварцевой меры и КМД, изготовленных из стали, и окружающей среды в течение трех часов в помещении со стабилизированной нормаль-

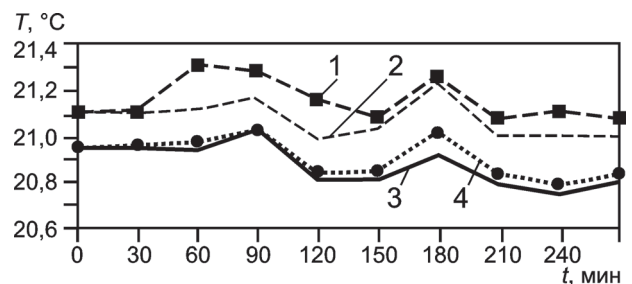


Рис. 2. Распределение температурных полей во времени:

1, 2, 3, 4 — соответственно температуры окружающей среды; стойки кварцевой меры 16 мм; КМД 16 мм

ной температурой показали, что эти поля имеют нестационарный характер. При этом переходные процессы зависят как от термодинамических свойств элементов системы, так и от размеров объектов (рис. 2).

Температурные деформации КМД измеряли прибором «Электронный блок БВ-6463-02» с двумя индуктивными датчиками (первичными преобразователями). Чтобы исключить влияние температуры окружающей среды меры, указанный прибор с датчиками и компьютерный термограф разместили в климатической камере MHV-225 CLSA. В камере установили нормальную температуру 20 °С, после чего определяли распределение температуры на измерительных поверхностях КМД в месте крепления датчиков на стойке и на стойке ИКПВ.

Для исследования температурных деформаций КМД использовали измерительную систему, включающую: измерительную стойку, оснащенную измерительным прибором с двумя преобразователями линейных перемещений; компьютерный термограф со встроенным программным обеспечением; климатическую камеру; образцовый объект с ТКЛР, на порядок меньшим, чем у измеряемого объекта (при соблюдении этого условия влиянием объекта на температурную деформацию измеряемого объекта можно пренебречь); измеряемый объект — КМД.

Экспериментально-аналитическая методика исследования температурных деформаций КМД состоит из следующих основных этапов и операций:

оценки нестационарности температурных полей элементов измерительной системы и объектов измерений термографическим методом в реальных условиях;

размещения измерительной системы, образцового и измеряемого объектов в климатической камере;

установки измерительных наконечников датчиков на образцовый и измеряемый объект (при этом нужно обеспечить одинаковые показания цифровых индикаторов измерительного прибора для выходных сигналов каждого датчика);

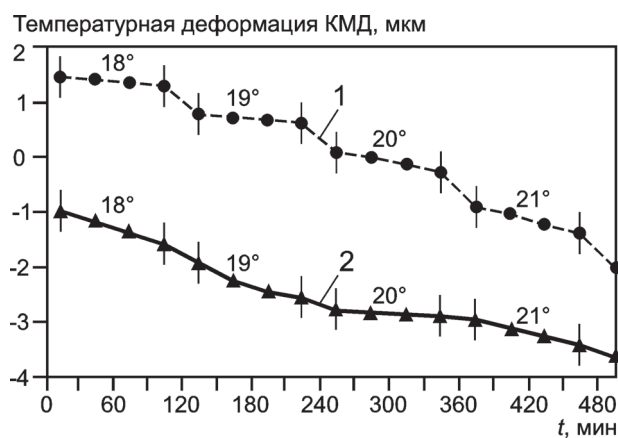


Рис. 3. Температурные деформации концевых мер длины 1, 2, соответственно 90 и 16 мм по разнице показаний датчиков А и В

установки заданной температуры климатической камеры и выдержки измерительной системы в камере до стабилизации температуры всех элементов и показаний цифровых индикаторов измерительного прибора;

построения экспериментальной зависимости температурной деформации КМД от температуры в климатической камере для заданного диапазона температур;

аналитического определения коэффициента температурной деформации K_T измеряемого объекта по полученной экспериментальной зависимости методом линейных регрессионных моделей.

Практическую реализацию предложенной экспериментально-аналитической методики исследования температурных деформаций КМД проводили в лаборатории государственного инжинирингового центра МГТУ «СТАНКИН». При этом использовали измерительную стойку ИКПВ, измерительный прибор БВ-6463-02 с двумя индуктивными датчиками линейных перемещений и с цифровым и шкальным индикаторами, климатическую камеру MHV-225 CLSA, кварцевые меры длины и КМД длиной 16 и 90 мм. В качестве образцового объекта в проведенных экспериментах применяли меры длины 90 и 16 мм из кварцевого стекла с ТКЛР $1 \cdot 10^{-6}$ (ТКЛР КМД, изготовленных из стали, находится в пределах $10 \cdot 10^{-6} — 17 \cdot 10^{-6}$), а объектами измерений были КМД тех же номинальных размеров из набора мер третьего разряда первого класса

Методика проведения экспериментов по исследованию температурных деформаций основана на определении линейных деформаций КМД при различных значениях температуры в климатической камере. Температуру задавали с шагом 1 °С в диапазоне 18—21 °С, что соответствует нормальным условиям проведения линейных измерений [8].

Изменение положения точки соприкосновения измерительного наконечника датчика линейных перемещений с концевой мерой, посредством которого оценивали ее деформации, определяли по показаниям прибора БВ-6463-02. Измерительный наконечник одного из датчиков устанавливали на кварцевую меру, а другого — на исследуемую КМД. По показаниям цифровых индикаторов фиксировали перемещение каждого наконечника в микрометрах. Показания прибора регистрировали с периодом $T = 30$ мин. Перед началом экспериментов обеспечивали одинаковые показания от выходных сигналов обоих датчиков, а температуру в климатической камере устанавливали 18 °С и затем повышали с шагом 1 °С до 21 °С.

По показаниям прибора, соответствующим перемещению установленного на КМД наконечника датчика А определяли температурную деформацию всей измерительной системы, а по показаниям, соответствующим перемещению установленного на кварцевой мере наконечника датчика В — температурную деформацию этой системы без учета деформации КМД (рис. 3). Разность между показаниями датчиков принимали в качестве значения температурной деформации исследуемой КМД.

Графики зависимости изменения значений температурной деформации от времени для КМД 90 и 16 мм в диапазоне температур, установленных в климатической камере, представлены на рис. 3.

При аналитической обработке экспериментальных данных использовали метод наименьших квадратов (МНК), широко применяемый для построения регрессионных моделей. Для обработки экспериментально полученной зависимости температурной деформации исследуемой КМД применяли линейную регрессию с последующей проверкой значимости полученной линейной модели по критерию Фишера.

Для расчета температурных деформаций КМД использовали линейную регрессионную модель в типовой форме

$$Y = CX + D \quad (1)$$

где Y — среднее значение разности показаний прибора, соответствующее перемещениям наконечников датчиков, размещенных на исследуемой КМД и на образцовой кварцевой мере; X — значение температуры в климатической камере; C , D — параметры линейной модели.

В результате расчета по (1) для концевой меры 90 мм получили следующие значения параметров линейной модели: $C = -0,843$ мкм/°С; $D = 16,616$ мкм.

В построенной линейной модели (1) коэффициент корреляции $R = 0,9957$, что свидетельствует о выполнении условий линейности модели для исходных экспериментальных данных. Для короткой концевой меры 16 мм параметры аналогичной линейной модели при коэффициенте корреляции $R = 0,9848$: $C = -0,693$ мкм/°С; $D = 11,062$ мкм.

Рассчитанные значения критерия Фишера составили $F = 229,79$ при 90 мм и $F = 64,22$ при 16 мм, что существенно превышает табличные. Следовательно, построенные линейные модели при вычисленных параметрах C и D являются значимыми.

На основании параметров построенных моделей коэффициент температурной деформации K_T исследуемых концевых мер длины определяли как: $K_T = |C|$.

В проведенных экспериментальных исследованиях значения K_T составили соответственно для КМД длиной 90 и 16 мм: $K_{T(90)} = 0,843$; $K_{T(16)} = 0,698$. Таким образом, значения коэффициента температурных деформаций зависят от длины КМД, причем этот коэффициент тем больше, чем длиннее мера.

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

Л и т е р а т у р а

1. **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.
2. **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.
3. **Марков Н. Н., Сацердотов П. А.** Погрешности от температурных деформаций при линейных измерениях. М.: Машиностроение, 1976.
4. **ГОСТ 8.592—2009.** ГСИ. Меры рельефные нанометрического диапазона из монокристаллического кремния.
5. **Башевская О. С. и др.** Исследование влияния температурных деформаций на точность линейных измерений // Измерительная техника. 2013. № 9. С. 34—36; **Bashevskaya O. S.** An Investigation of the Influence of Temperature Deformations on the Precision of Linear Measurements // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 9. P. 1016—1020.
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. **ГОСТ 8.050—73.** ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений.

Дата принятия 15.12.2013 г.