

А. В. Глубоков, И. О. Тверитнев

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА БАЗЫ ДЛЯ ОТСЧЕТА ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ПЛОСКОСТНОСТИ НА МЕТОДИЧЕСКУЮ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

A. V. Glubokov, I. O. Tveritnev

INFLUENCE OF MEASUREMENT DATUM SELECTION ON METHODOICAL MEASUREMENT ERROR

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования является процесс измерения отклонений от плоскостности поверхностей координатным методом. Предметом исследования является методическая погрешность измерения, возникающая при обработке результатов измерений отклонений от плоскостности. При измерении отклонений формы методическая погрешность во многих случаях является доминирующей, поэтому ее исследование является актуальной задачей. Целью работы является определение предельных значений методической погрешности измерения отклонений от плоскостности, вызванной выбором базы для отсчета. **Материалы и методы.** В качестве базы для отчета отклонений от плоскостности используются средняя и прилегающая плоскости. Для построения прилегающей плоскости используются как стандартные алгоритмы, так и алгоритмы, разработанные авторами. Разработано программное обеспечение, позволяющее реализовать все указанные алгоритмы и провести их сравнительный анализ. **Результаты.** Проведены исследования методической погрешности измерения отклонений от плоскостности на основе экспериментальных данных и математического моделирования. Определены предельные значения методической погрешности измерения отклонений от плоскостности при использовании в качестве базы для отсчета средней и прилегающей плоскости. Выявлена зависимость между значением методической погрешности и характером расположения точек измерения. **Выводы.** Проведенные исследования показали, что методическая погрешность, вызванная использованием средней плоскости в качестве базы для отсчета вместо прилегающей плоскости, во многих случаях имеет значительную величину и приводит к завышению полученных значений отклонений от плоскостности, что необходимо учитывать при анализе результатов измерений.

A b s t r a c t. Background. The paper considers flatness errors measurement by means of coordinate method. The methodical error of data processing is subject of investigation, because it is the most significant among other error components. The paper considers boundaries of error caused by measurement datum selection. **Materials and methods.** Either least squares reference or minimum zone reference planes is used as measurement datum. In order to build the planes both standard and original algorithms are used. The authors have developed original software in order to realize the algorithms mentioned above and compare them. **Results.** The paper studies the dependence of methodical error on datum selection based on experimental data and modeling. The error boundaries were determined for all data available. The dependence between error value and position of measuring points was determined. **Conclusions.** The paper concludes the methodical error in case of least squares reference plane used as datum is significant is increases error measurement results. This should be taken into consideration during actual measurement.

К л ю ч е в ы е с л о в а: отклонения формы, отклонения от плоскостности, методическая погрешность, координатно-измерительная машина.

Key words: deviations from form, deviations from flatness, methodical errors, coordinate-measurement machine.

В современной машиностроительной индустрии нашей страны и развитых в данном техническом аспекте зарубежных стран все большее внимание уделяется точности и надежности выпускаемых изделий в различных областях, таких как станкостроение, автомобилестроение, авиастроение [1–3]. Повышенное внимание к точностным параметрам изделий обусловлено зависимостью между точностью и функционально-эксплуатационными характеристиками изделий.

На данном этапе развития до сих пор остаются проблемы, связанные с обеспечением точности измерения размеров, отклонений формы и расположения поверхностей [4, 5]. Следует отметить, что часто погрешность средств измерения мала, а основное влияние оказывает методическая погрешность измерения. Одной из таких задач, где доминирующей является погрешность метода, является измерение отклонений от плоскостности.

Для измерения отклонений от плоскостности протяженных поверхностей широко применяются оптические и оптико-механические средства измерения (автоколлиматоры, интерферометры, зрительные трубы), различные виды уровней. Для деталей меньших размеров наиболее часто применяют координатно-измерительные машины (КИМ), обеспечивающие высокую производительность и точность измерения требуемых параметров деталей [6–8].

В прошлые десятилетия было разработано достаточное количество нормативной документации в области нормирования и измерения отклонений формы поверхностей [9, 10]. Разработанная документация содержала рекомендации по выбору методов и средств измерения, позволяющие уменьшить трудоемкость процесса обработки результатов измерения и влияющие на качество контроля отклонения от плоскостности исследуемого изделия. Существенным недостатком этих документов является их направленность на ручную обработку результатов измерений. Предложенные алгоритмы содержат существенные упрощения, которые могут вводить значительную методическую погрешность. Возникает необходимость обновления данных документов с учетом современных возможностей вычислительной техники.

Другой проблемой измерений отклонений формы на современном этапе является массовое использование универсальных средств измерений [11]. Наиболее востребованным становится координатный метод измерения, погрешность которого во многом определяется параметрами методики измерения и используемыми алгоритмами обработки результатов измерений. В программном обеспечении КИМ обычно применяют метод наименьших квадратов. Достоинством метода наименьших квадратов является понятный алгоритм определения неизвестных параметров по выборочным данным. Существенным недостатком использованного метода является зависимость методической погрешности от получаемых исходных данных [12].

Согласно нормативным документам базой для отчета отклонения от плоскостности является прилегающая плоскость, а не средняя плоскость, определенная по методу наименьших квадратов. В работе [13] проводилось изучение вопроса, связанного с методической погрешностью при координатном методе измерения отклонений от прямолинейности. Показано, что алгоритмы, используемые в программном обеспечении современных КИМ, вносят существенную методическую погрешность. Так, например, при использовании средней прямой в качестве базы для отсчета методическая погрешность может достигать 50 %.

Также для машиностроительных производств существенной является задача установления зависимости между производительностью и точностью измерения отклонения от плоскостности, т.е. определение таких значений производительности измерений, которые не приводят к существенному снижению точности измерения. Основным фактором, влияющим на эти параметры, является количество контрольных точек. Вопросы влияния числа контрольных точек на погрешность измерения прямолинейности исследованы в работе [14], в которой даны рекомендации по выбору оптимального количества точек при измерении отклонения от прямолинейности. Необходимо проведение аналогичных исследований при измерении отклоне-

ний от плоскостности, особенно учитывая тот факт, что количество контрольных точек значительно больше, чем при измерении отклонений от прямолинейности.

Основной целью данной работы является определение предельных значений методической погрешности измерения отклонений от плоскостности, вызванной выбором базы для отсчета, ее зависимостью от характера расположения точек на поверхности, и оценка влияния количества контрольных точек на эту погрешность.

В первой части исследования проводились измерения плоских поверхностей на координатно-измерительных машинах. В качестве объекта измерения использовались чугунные поверочные плиты размерами 250×250 мм и 400×400 мм, детали, полученные механической и аддитивной видами обработки. Количество продольных и поперечных сечений выбиралось в зависимости от вида и размеров деталей. Для некоторых деталей проведены измерения с различным количеством продольных и поперечных сечений. Обработка результатов измерений проводилась двумя способами: с помощью программного обеспечения КИМ (средняя плоскость, определенная по методу наименьших квадратов) и с помощью специального программного обеспечения, разработанного автором (прилегающая плоскость) [15]. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований значений отклонений от плоскостности

Деталь	Количество продольных и поперечных сечений	Отклонение от прилегающей плоскости, мкм	Отклонение от средней плоскости, мкм	Методическая погрешность, %
Плита 1	9 × 9	7,8	8,8	12,8
Плита 1	5 × 5	6,9	7,4	7,2
Плита 2	5 × 5	6,3	6,9	9,5
Плита 3	11 × 11	10,8	11,5	6,4
Деталь 1	5 × 9	23,2	24,8	6,9
Деталь 2	5 × 9	17,5	19,2	9,7
Деталь 3	4 × 4	8,5	9,2	8,2
Деталь 3	7 × 7	8,6	9,4	9,3
Деталь 4	4 × 4	7,6	8,8	15,8
Деталь 4	7 × 7	11,0	11,8	7,2

Среднее значение методической погрешности, вызванной использованием средней плоскости в качестве базы для отсчета, составило 9,3 %. Минимальное значение погрешности равно 6,4 %.

Во второй части исследования проводилось математическое моделирование поверхностей с различным количеством продольных и поперечных сечений. Обработка результатов измерений проводилась также двумя способами: относительно средней плоскости и относительно прилегающей плоскости. В табл. 2 приведены значения методической погрешности измерения, вызванной выбором базы для отсчета отклонений.

Таблица 2

Значения методической погрешности при разном количестве сечений

Методическая погрешность	Количество продольных и поперечных сечений					
	5	7	9	11	13	15
Среднее значение погрешности, %	10,3	9,1	5,9	6,1	5,0	4,1
Наибольшее значение погрешности, %	28,2	23,6	19,0	15,0	18,4	9,2
Наименьшее значение погрешности, %	1,0	2,2	0,1	0,8	0,6	0,1

По результатам моделирования можно сделать вывод об уменьшении методической погрешности при увеличении количества продольных и поперечных сечений. Эта тенденция действительно наблюдается на практике, но необходимо сделать одно важное замечание. В данном случае при моделировании координаты точек задавались случайным образом.

При достаточно большом количестве сечений характер поверхности регулярно приобретает вид, который редко можно встретить на практике, а именно: для таких поверхностей наблюдается значительное снижение методической погрешности. Поэтому для практики более интересны результаты моделирования при пяти и семи сечениях, так как они приближены к реальным измерительным задачам. При этом увеличение продольных и поперечных сечений посредством добавления промежуточных точек к результатам моделирования по пяти и семи сечениям практически не приводит к изменению значений методической погрешности. На основании моделирования можно сделать вывод о том, что методическая погрешность, вызванная использованием средней плоскости в качестве базы для отсчета, присутствует всегда и в среднем составляет 10 %. Значения погрешности менее 5 % встречаются крайне редко.

В третьей части исследования делалась попытка определить максимальные значения методической погрешности, вызванной использованием средней плоскости в качестве базы для отсчета, и характер расположения точек поверхностей соответствующих максимальным значениям. Для решения поставленной задачи подход осуществлялся двумя способами.

Первоначально выбирались результаты математического моделирования поверхностей, которые соответствуют наибольшим значениям методической погрешности. Проводился анализ характера расположения точек на поверхности, и решалась задача максимизации значения погрешности путем изменения координат характерных точек. Результаты показывают, что в предельных случаях значение погрешности достигало 35–40 %. При этом нельзя говорить о выявлении определенного типа поверхности, у которой наблюдается максимальное значение погрешности, но, как правило, присутствуют резкие изменения координат точек в крайних сечениях. На практике подобные поверхности регулярно встречаются. Например, поверочные плиты часто имеют существенные занижения в угловых точках поверхности.

Также для выявления характера расположения точек поверхностей, соответствующих максимальным значениям методической погрешности, были использованы результаты аналогичных исследований для отклонений от прямолинейности [13]. Наибольшая погрешность возникает при наличии периодической составляющей (рис. 1).

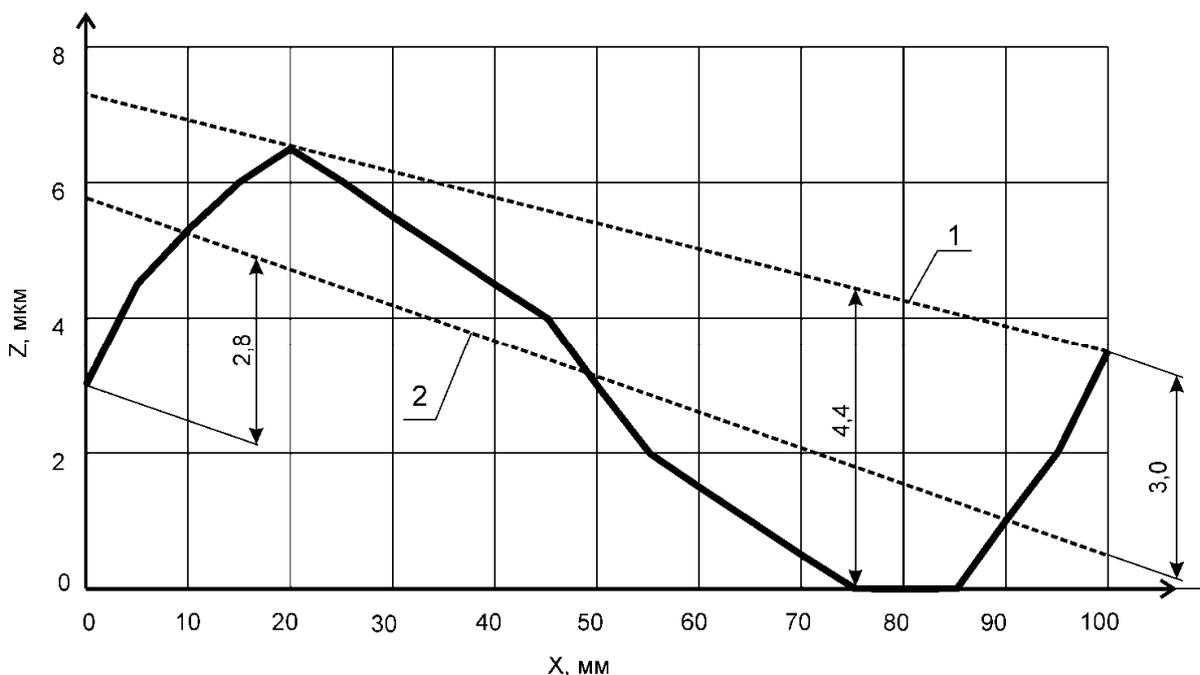


Рис. 1. Пример профиля с предельными значениями методической погрешности:
1 – прилегающая прямая; 2 – средняя прямая

Для профиля, изображенного на рис. 1, методическая погрешность при использовании средней прямой равна 32 %. В предельных случаях значение методической погрешности для средней прямой может достигать 50 %. При построении поверхности, у которой во всех про-

дольных сечениях профиль будет аналогичным профилю, приведенному на рис. 1, значение методической погрешности будет таким же, т.е. в предельных случаях будет достигать 50 %.

На основании анализа были смоделированы поверхности, которые могут реально встречаться на практике, с наибольшим значением методической погрешности, вызванной выбором базы для отсчета. Пример такой поверхности приведен на рис. 2.

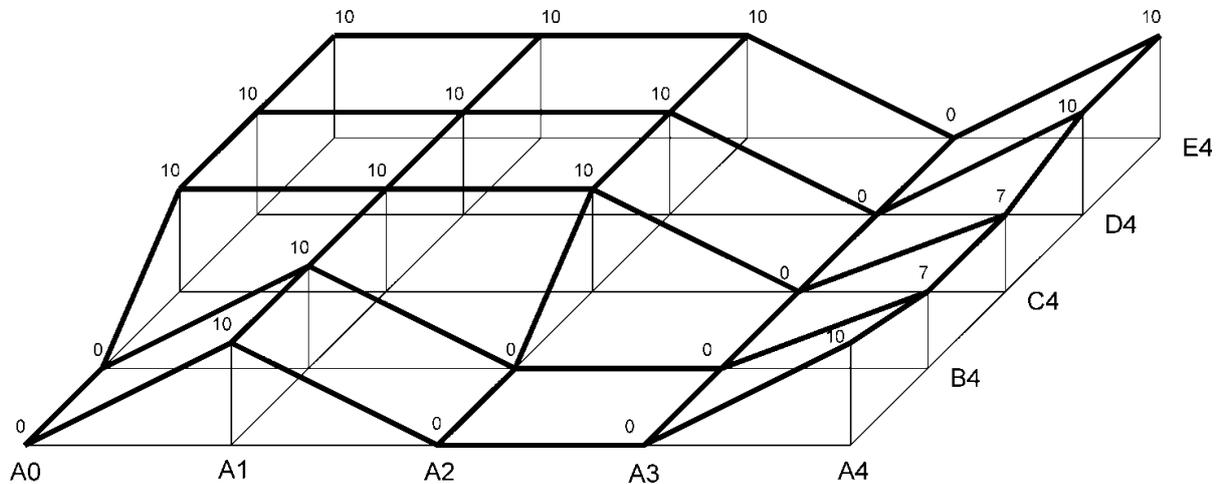


Рис. 2. Пример поверхности с предельными значениями методической погрешности

Методическая погрешность при использовании средней плоскости в качестве базы для отсчета для поверхности, изображенной на рис. 2, составляет 55 %.

Проведенные исследования показали, что методическая погрешность, вызванная использованием средней плоскости в качестве базы для отсчета вместо прилегающей плоскости, во многих случаях имеет значительную величину. Предельные значения данной погрешности превышают 50 %. При координатных методах измерения для обработки результатов в большинстве случаев используется программное обеспечение, поставляемое производителями измерительного оборудования, которое ориентировано на построение средней плоскости по методу наименьших квадратов. Это приводит к завышению полученных значений отклонений от плоскостности, что необходимо учитывать при анализе результатов измерений.

Работы проведены на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки РФ. Соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004.

Библиографический список

1. Проблемы метрологического обеспечения подготовки производства в машиностроении / С. Н. Григорьев, В. И. Телешевский, А. В. Глубоков, С. Е. Педь, С. В. Глубокова // Измерительная техника. – 2012. – № 5. – С. 27–29.
2. Григорьев, С. Н. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства / С. Н. Григорьев, Д. А. Мастеренко, В. И. Телешевский, П. Н. Емельянов // Измерительная техника. – 2012. – № 11. – С. 56–59.
3. Григорьев, С. Н. Развитие пространственной метрологии для обеспечения контроля сложных поверхностей в машиностроении / С. Н. Григорьев, С. Г. Конов // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 12. – С. 9–13.
4. Телешевский, В. И. Лазерная измерительная информационная система для повышения точности многокоординатных станков с ЧПУ / В. И. Телешевский, В. А. Соколов // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 4. – С. 8–10.
5. Телешевский, В. И. Повышение точности измерений линейно-угловых размеров изделий в интеллектуальной компьютерной микроскопии / В. И. Телешевский, А. В. Шулепов, Е. М. Роздина // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 4. – С. 35–38.
6. Разработка модельного ряда координатно-измерительных машин / Д. А. Мастеренко, П. Н. Емельянов, М. Г. Ковальский, А. Ю. Байковский, С. Ю. Алабин // Измерительная техника. – 2013. – № 12. – С. 23–27.

7. Емельянов, П. Н. Разработка эталонной координатно-измерительной машины с ЧПУ / П. Н. Емельянов, С. Е. Педь, И. Е. Холин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – Т. 10, № 8. – С. 68–73.
8. Конов, С. Г. Разработка координатно-измерительной машины контактного типа на базе фотограмметрической системы / С. Г. Конов // Вестник МГТУ Станкин. – 2010. – № 2. – С. 119–121.
9. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении. Контроль деталей : справочное издание. – М. : Изд-во стандартов, 1989.
10. МИ 2007-89. ГСИ. Плиты поверочные и разметочные. Методика поверки.
11. Глубоков, А. В. Анализ методик измерения отклонений формы координатным методом / А. В. Глубоков // Вестник МГТУ Станкин. – 2017. – № 1. – С. 72–77.
12. Педь, С. Е. Исследование методической погрешности координатных измерений геометрических параметров деталей машин / С. Е. Педь // Измерительная техника. – 2014. – № 3. – С. 28–32.
13. Глубоков, А. В. Исследование методической погрешности измерения отклонений от прямолинейности / А. В. Глубоков, С. Е. Педь // Вестник МГТУ Станкин. – 2016. – № 2. – С. 71–75.
14. Глубоков, А. В. Влияние числа контрольных точек на погрешность измерения отклонений от прямолинейности / А. В. Глубоков, С. Е. Педь, С. В. Глубокова // Измерительная техника. – 2017. – № 2. – С. 24–27.
15. Телешевский, В. И. Компьютеризированная измерительная информационная система для контроля отклонений плоскостности на базе электронных уровней / В. И. Телешевский, А. В. Глубоков // Измерительная техника. – 2004. – № 11. – С. 15–18.

Глубоков Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра измерительных
информационных систем и технологий,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
(Россия, г. Москва, Вадковский пер.,1)
E-mail: al-glubokov@yandex.ru

Glubokov Alexandr Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor
sub-department of measuring
information systems and technologies,
Moscow State Technological University «STANKIN»
(1 Vadkovsky per., Moscow, Russia)

Тверитнев Илья Олегович

аспирант,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
(Россия, г. Москва, Вадковский пер.,1)
E-mail: il.rabota2017@yandex.ru

Tveritnev Ilya Olegovich

postgraduate student,
Moscow State Technological University «STANKIN»
(1 Vadkovsky per., Moscow, Russia)

УДК 681.2.083

Глубоков, А. В.

Влияние выбора базы для отсчета отклонений от плоскостности на методическую погрешность измерения / А. В. Глубоков, И. О. Тверитнев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 45–50. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-7.