

Коррекция положения инструмента при обеспечении качества изготовления прецизионных поверхностей деталей на многоцелевых станках с ЧПУ

© М.В. Носов, А.И. Кондаков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Изготовление корпусных деталей современных машин и приборов точной механики часто вызывает затруднения особенно при мелкосерийном производстве, что обусловлено их сложной конфигурацией и наличием поверхностей с точностью, например, диаметральных размеров, соответствующей IT5, IT6. Качественное изготовление таких поверхностей достигают на современных многоцелевых станках с ЧПУ, но лишь при использовании нетривиальных технологических решений и приемов. Предложена методика коррекции положения инструмента, благодаря которой повышается качество изготовления прецизионных поверхностей корпусных деталей лезвийной обработкой на многоцелевых станках с ЧПУ в мелкосерийном производстве. Методика предусматривает выполнение рабочих ходов чистой (окончательной) обработки с постоянной глубиной резания и коррекцией положения инструмента по результатам измерения выдерживаемого размера. Применение этой методики обеспечивает точность диаметральных размеров поверхностей деталей из конструкционных сталей, магнито-мягких материалов, титановых и алюминий-магниевого сплавов, соответствующую IT5, IT6. Формализованный характер методики позволяет автоматизировать определение необходимой коррекции.

Ключевые слова: деталь, прецизионная поверхность, точность, станок с ЧПУ, инструмент, положение, коррекция, качество.

Конструкции корпусных деталей современных машин и приборов точной механики часто имеют наружные и внутренние цилиндрические поверхности, точность диаметральных размеров которых соответствует 5–6-му квалитетам ISO. Возможности современных многоцелевых станков с ЧПУ позволяют обеспечить качество изготовления таких поверхностей, но лишь при использовании нетривиальных технологических решений и приемов [1, 2].

Стабильное обеспечение качества прецизионных, в том числе термически обработанных, поверхностей на многоцелевых станках с ЧПУ [3] позволяет принципиально изменить построение процессов изготовления корпусных деталей даже из труднообрабатываемых материалов.

Обеспечить заданную точность изготовления деталей на станках с ЧПУ можно за счет коррекции (предыскажение) траектории относительного перемещения или положения инструмента и обрабатываемой заготовки. Коррекция может выполняться на основании предварительных расчетов или измерений [4–6]. Проведение измерений

непосредственно на станке при выполнении операции и использование этих результатов для коррекции положения инструмента повысило надежность обеспечения точности изготовления прецизионных поверхностей, методика которого приведена в [3].

Суть предложенной методики рассмотрим на примере изготовления отверстия с точностью диаметрального размера по *H6* растачиванием на фрезерно-токарном станке с ЧПУ. Исходим из следующих основных положений и допущений:

1) доминирующее влияние на точность диаметрального размера изготавливаемого отверстия оказывает погрешность, вызванная упругими деформациями технологической системы под действиями сил резания;

2) действует закон копирования погрешностей в упругой технологической системе;

3) жесткость технологической системы переменна по образующей растачиваемого отверстия, но в каждом сечении, перпендикулярном оси отверстия, изменяется незначительно;

4) значения сил резания при растачивании прямо пропорциональны значениям глубины резания (припуска, снимаемого за один рабочий ход) [7];

5) на каждом из отдельных этапов изготовления отверстия параметры режима резания неизменны, за исключением глубины резания;

6) точность отверстия обеспечена, если погрешность диаметрального размера и погрешность формы отверстия находятся в пределах допуска.

Предварительными исследованиями установлено, что отверстия, расточенные на фрезерно-токарном станке с ЧПУ с точностью диаметрального размера *H9*, имеют комбинированное отклонение — конусность с меньшим основанием со стороны входа инструмента и бочкообразность (рисунок).

Конусность является доминирующим отклонением формы, погрешность формы в продольном сечении отверстия можно определить по формуле

$$\Delta_{\phi} = [D_{\max}(H9) - 2\delta_B] - [D_{\max}(H9) - 2\delta_A], \quad (1)$$

где $D_{\max}(H9)$ — максимальный диаметр отверстия с допуском по *H9*; $2\delta_B$, $2\delta_A$ — отклонения размеров радиусов изготавливаемого отверстия, измеренные на торцах *A* и *B* соответственно (см. рисунок),

$$\Delta_{\phi} \leq k[\Delta_D]. \quad (2)$$

Здесь k — доля погрешности формы в допуске $[\Delta_D]$ на выдерживаемый диаметральный размер, $k = 0,5$ для допуска *H9*, $k = 0,2...0,25$ для допуска *H6*.

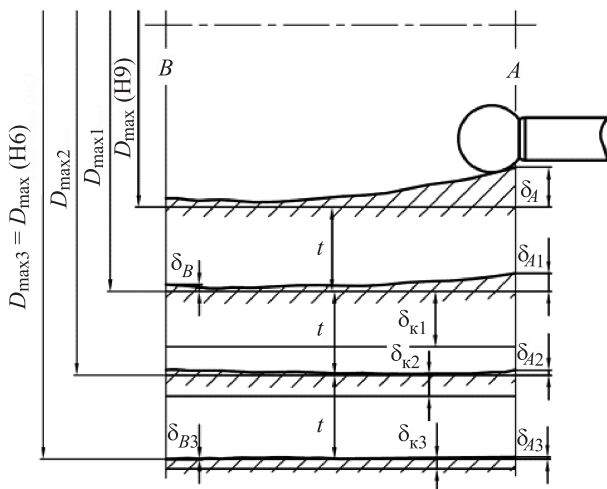


Схема обеспечения точности диаметрального размера растачиваемого отверстия по *H6* коррекцией положения инструмента:

$D_{\max}(H6), D_{\max}(H9)$ — максимальный диаметр отверстия с точностью, соответствующей *H6* и *H9*; $D_{\max 1}-D_{\max 3}$ — максимальный диаметр обрабатываемого отверстия после корректирующих рабочих ходов 1–3 соответственно; t — номинальная глубина резания на каждом корректирующем рабочем ходе; $\delta_A, \delta_{A1}, \dots, \delta_{A3}$ — отклонения радиуса изготавливаемого отверстия, измеренное на торце *A*, соответственно исходное и после корректирующих рабочих ходов 1–3; δ_B — отклонение радиуса изготавливаемого отверстия, измеренное на торце *B*, исходное

С учетом (1) и (2) получим

$$\delta_A - \delta_B \leq 0,25 [\Delta_D (H9)], \quad (3)$$

где $\Delta_D (H9)$ — допуск *H9* на выдерживаемый диаметральный размер. Аналогично для допуска *H6* (см. рисунок)

$$\delta_{A3} - \delta_{B3} \leq (0,1 \dots 0,125) [\Delta_D (H6)]. \quad (4)$$

Ограничение (3) является условием применения коррекции положения инструмента для достижения заданного качества отверстия. Ограничение (4) наряду с допуском на соответствующий диаметральный размер — условие обеспечения качества изготовления отверстия.

Общий (суммарный) припуск на чистовую (окончательную) обработку для рассматриваемого примера определяют по формуле

$$z = \frac{D_{\max}(H6) - D_{\max}(H9)}{2}.$$

Здесь $D_{\max}(H6)$ — максимальный диаметр отверстия с допуском по $H6$ (см. рисунок). Общий припуск удаляют за i рабочих ходов чистовой (отделочной) обработки — корректирующих рабочих ходов. Тогда

$$z = ti, \quad (5)$$

где t — номинальная глубина резания на каждом корректирующем рабочем ходе, $t = z/i$.

В рассматриваемом примере (см. рисунок) выполнено три корректирующих рабочих хода.

Перед выполнением первого корректирующего рабочего хода измеряют фактический диаметральный размер обрабатываемой поверхности в трех плоскостях, перпендикулярных оси отверстия. Измерение выполняют с помощью контактного датчика, например Reni-shaw MP40. Полученное значение сравнивают со значением размера $D_{\max}(H9)$. Определяют значения отклонений размеров радиусов $2\delta_B$, $2\delta_A$ вблизи торцов A и B , а также в середине образующей отверстия. Проверяют соблюдение условий (3). Определяют максимальное значение отклонения фактического диаметрального размера от значения $D_{\max}(H9)$. В рассматриваемом примере это отклонение равно $2\delta_A$, соответствующее торцу A отверстия (см. рисунок).

Кроме номинальной глубины резания t перед выполнением первого корректирующего рабочего хода проводят коррекцию положения инструмента — смещают вершину инструмента относительно номинального размера $D_{\max1}$ (см. рисунок) на величину δ_{K1} в «тело» заготовки. В рассматриваемом примере

$$\delta_{K1} = \delta_A.$$

Предполагают, что корректирующее смещение в значительной мере обеспечит компенсацию погрешностей, вызываемых упругими деформациями технологической системы под действием сил резания. Коррекцию вводят с пульта устройства ЧПУ станка.

Перед вторым корректирующим рабочим ходом фактический диаметральный размер отверстия измеряют лишь в одной плоскости (вблизи торца A). Величина коррекции положения инструмента (δ_{K2}):

$$\delta_{K2} = \delta_{A1}.$$

Аналогичные действия выполняют перед третьим корректирующим рабочим ходом. Величина коррекции положения инструмента:

$$\delta_{к3} = \delta_{A2}.$$

Значение δ_{A3} используют для оценки качества изготовления отверстия.

Глубина резания в каждом корректирующем рабочем ходе отличается от глубины резания предыдущего хода на величину введенной коррекции. В остальном же для каждого рабочего хода стремятся в наибольшей мере сохранить одинаковые с другими ходами условия его выполнения, тем самым стабилизируя влияние элементарных погрешностей обработки на точность выдерживаемого размера и минимизируя его вводимой коррекцией.

Априори при неизвестной ожидаемой погрешности формы изготавливаемого отверстия в продольном сечении измерение фактического диаметрального размера следует выполнять в трех плоскостях по длине образующей отверстия, а величину и знак коррекции положения инструмента устанавливать по максимальному отклонению.

При неизменности упругих свойств технологической системы и ее элементов, в частности свойств материала заготовки, могут быть оценены ожидаемые значения максимального отклонения выдерживаемого размера после каждого из корректирующих рабочих ходов.

Максимальная глубина резания при выполнении первого корректирующего рабочего хода на торце A изготавливаемого отверстия составит (см. рисунок):

$$t_{A1} = t + \delta_A + \delta_{к1} = t + \delta_A + \delta_A = t + 2\delta_A.$$

Считая отклонение радиуса изготавливаемого отверстия прямо пропорциональным упругой деформации технологической системы под действием сил резания и пренебрегая действием иных факторов, после первого корректирующего рабочего хода получим:

$$\delta_{A1} \approx \delta_A \frac{t + 2\delta_A}{t_0}, \quad (6)$$

где t_0 — глубина резания при выполнении последнего рабочего хода, обеспечивающего диаметральный размер $D_{\max}(H9)$. Другие параметры режима резания для рассматриваемых рабочих ходов приняты одинаковыми. Величина $(t + 2\delta_A)/t_0$ является коэффициентом уточнения отклонения радиуса изготавливаемого отверстия. Аналогично после второго корректирующего рабочего хода

$$\delta_{A2} \approx \delta_{A1} \frac{t + 2\delta_{A1}}{t + 2\delta_A}. \quad (7)$$

Значения отклонений радиусов изготавливаемого отверстия, получаемые после каждого i -го корректирующего рабочего хода, рекуррентно связаны:

$$\delta_{Ai} \approx \delta_{A(i-1)} \frac{t + 2\delta_{A(i-1)}}{t + 2\delta_{A(i-2)}}. \quad (8)$$

Здесь индексами i , $i-1$, $i-2$ помечены значения указанных отклонений после выполнения соответствующих корректирующих рабочих ходов. Рекуррентный характер полученных зависимостей позволяет выразить значения отклонений, образуемых после каждого рабочего хода, через их первичные значения. В частности, подставив в (7) значение δ_{A1} , выраженное из (6), получим

$$\delta_{A2} = \delta_A \frac{t + 2\delta_A \frac{t + 2\delta_A}{t_0}}{t_0}. \quad (9)$$

Записав значение отклонения радиуса изготавливаемого отверстия после выполнения i -го корректирующего рабочего хода δ_{Ai} аналогично (9) и учитывая, что погрешность формы в поперечном сечении ограничена (2), пренебрегая величинами второго порядка малости, получим выражение для определения глубины резания t на каждом корректирующем рабочем ходе. Для рассматриваемого примера

$$t \leq \frac{t_0 k [\Delta_D (H6)]}{[\Delta_D (H9)]}, \quad (10)$$

где значение k принимают в соответствии с (2). Задавшись максимальным значением t и зная общий (суммарный) припуск на чистовую (окончательную) обработку из (5), можно определить число корректирующих рабочих ходов i .

Если перед чистовой (отделочной) обработкой выполнялось химико-термическое упрочнение материала заготовки, то его свойства изменяются и (6) может не выполняться. Измерение отклонений выдерживаемого диаметрального размера от заданного следует выполнять в трех плоскостях перед каждым корректирующим рабочим ходом и вводить коррекцию положения инструмента в зависимости от знака максимального отклонения. Первый корректирующий рабочий ход (после химико-термической обработки) целесообразно выполнять без ввода коррекции положения инструмента и при минимальной глубине резания. Это позволит оценить влияние свойств материала на упругие деформации технологической системы и впоследствии учитывать соотношения, аналогичные (7)–(10) при расчете коррекции.

Разработанная методика коррекции положения инструмента прошла практическую апробацию [3] и успешно применяется при обеспечении качества изготовления отверстий в корпусных деталях из конструкционных сталей, магнитно-мягких материалов, титановых и алюминиевых сплавов в мелкосерийном производстве.

Таким образом, предложенная методика коррекции положения инструмента позволяет обеспечить изготовление отверстий с точностью диаметрального размера IT5, IT6 в корпусных деталях лезвийной обработкой на многоцелевых станках с ЧПУ в многосерийном производстве. В ней предусмотрено выполнение рабочих ходов чистой (окончательной) обработки отверстия с постоянной глубиной резания и коррекцией положения инструмента по результатам измерения выдерживаемого размера. Предложены зависимости, позволяющие определять глубину резания в каждом корректирующем рабочем ходе и необходимое число последних.

Применение методики обеспечивает стабилизацию влияния элементарных погрешностей обработки на точность выдерживаемого размера и минимизирует его вводимой коррекцией. Формализованный характер предложенной методики позволяет автоматизировать определение величины необходимой коррекции положения инструмента и выполнять ее при минимальных финансовых затратах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Штриплинг Л.О., Попов М.Г. Применение высокоскоростного фрезерования точных отверстий для совершенствования технологии производства корпусных деталей из алюминия. *Омский научный вестник*, 2010, № 3, с. 63–67.
- [2] Sarhan A.A.D., Hassan M.A., Matsubara A., Hamdi M. High-Precision Machining by Measuring and Compensating the Error Motion of Spindle's Axis of Rotation in Radial Direction. *Engineering Letters*, 19:4, EL_19_4_06.
- [3] Носов М.В., Кондаков А.И. Обеспечение качества изготовления прецизионных поверхностей деталей на многоцелевых станках с ЧПУ. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2014, № 6, с. 56–61.
- [4] Аверченков В.И., Филлипова Л.Б., Пугач Л.И. Программный комплекс определения величины коррекции на инструмент для обрабатывающих центров с датчиками активного контроля. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2013, вып. 7, ч. 1, с. 71–78.
- [5] Eichner T., Hohmann M., Linder I. Taktil oder berührungslos in-Process-messen? *Werkstatt + Betrieb*, 2012, no. 12.
- [6] Hennecke K. BAZ-Tuning für jedermann. *Werkstatt + Betrieb*, 2012, no. 11.
- [7] Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г., ред. *Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2*. Москва, Машиностроение-1, 2001. 944 с.

Статья поступила в редакцию 12.10.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Носов М.В., Кондаков А.И. Коррекция положения инструмента при обеспечении качества изготовления прецизионных поверхностей деталей на многоцелевых станках с ЧПУ. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/meng/1420.html>

Носов Михаил Валентинович — аспирант кафедры «Технология машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: mihail_nosov@mail.ru

Кондаков Александр Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: kondakov1950@mail.ru

Correction of tools position to ensure manufacturing quality of precision surfaces of the parts on multi-purpose CNC machines

© M.V. Nosov, A.I. Kondakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Manufacture of basic parts of modern machinery and instruments of precision mechanics often causes difficulties especially for small-scale production. This is due to their complex configuration, and the presence of surfaces with precision of, for example, the diametric dimension corresponding to IT5, IT6. Qualitative production of such surfaces is achieved on modern multi-purpose CNC machines, but only by using non-trivial technological solutions and techniques. Thanks to the proposed method of correction of tool position we improve the manufacturing quality of precision surfaces of the parts by edge cutting processing on multi-purpose CNC machines in small-scale production. The technique envisages execution of the work passes of finishing (final processing) with constant cutting depth and correction of the tool position by measurement results of the withstanding size. Application of this methodology provides accurate diametrical sizes of the surfaces of details made of structural steel, magnetically soft materials, titanium and aluminum-magnesium alloys corresponding to IT5, IT6. Formalized methodology automates determination of the necessary correction.

Keywords: part, precision surface, accuracy, CNC machine, instrument, position, correction, quality.

REFERENCES

- [1] Shtripling L.O., Popov M.G. *Omskiy nauchnyi vestnik. — Omsk Scientific Bulletin*, 2010, no. 3, pp. 63–67.
- [2] Sarhan A.A.D., Hassan M.A., Matsubara A., Hamdi M. High-Precision Machining by Measuring and Compensating the Error Motion of Spindle's Axis of Rotation in Radial Direction. *Engineering Letters*, 19:4, EL_19_4_06.
- [3] Nosov M.V., Kondakov A.I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2014, no. 6, pp. 56–61.
- [4] Averchenkov V.I., Filippova L.B., Pugach L.I. *Izvestiya TulGTU. Tekhnicheskiye nauki — Proceedings of Tula State University. Technical sciences*, 2013, issue 7, part 1, pp. 71–78.
- [5] Eichner T., Hohmann M., Linder I. Taktil oder berührungslos in-Process-messen? *Werkstatt + Betrieb*, 2012, no. 12.
- [6] Hennecke K. BAZ-Tuning für jedermann. *Werkstatt + Betrieb*, 2012, no. 11.
- [7] Dal'sky A.M., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., Suslov A.G., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya [Reference book for technologist-machine builder]*. In 2 vols. Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2001, 944 p.

Nosov M.V., post-graduate of the Mechanical Engineering Technology Department at Bauman Moscow State Technical University. e-mail: mihail_nosov@mail.ru

Kondakov A.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Mechanical Engineering Technology Department at Bauman Moscow State Technical University. e-mail: kondakov1950@mail.ru