

УДК 621.921:62-50:658.564

Петраков Ю.В., Ковальчук Д.П.
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Petrakov Y., Kovalchuk D.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (yp-86@yandex.ru)

ACCURACY INCREASE OF LATHE MACHINING ON CNC MACHINE-TOOLS

Представленный новый подход к повышению точности токарной обработки, который заключается в гипотезе о том, что вся необходимая апостериорная информация о процессе резания, станке и инструменте, необходимая для формирования управления, содержится в обработанной детали. Предложено срезать весь припуск за два прохода, после первого прохода выполнять измерения формы детали и по их результатам формировать скорректированную траекторию на втором, заключительном походе. Для расчета скорректированной траектории разработана математическая модель и соответствующий алгоритм. Моделирование предложенного метода полностью подтвердило корректность разработанной методики. Запланирована практическая проверка и разработка промышленного программного продукта для реализации метода на станках с ЧПУ. Рекомендуется применять метод при обработке крупногабаритных ответственных деталей либо нежестких деталей с высокими требованиями по точности.

Ключевые слова: коррекция формообразующей траектории, управление по апостериорной информации, токарные станки с ЧПУ.

Введение

Повышение точности механической обработки всегда является главной задачей машиностроительного производства. Как известно, погрешность обработки зависит от многих факторов, среди которых составляющая от упругих деформаций технологической обрабатывающей системы (ТОС) в некоторых случаях достигает 90% общей погрешности. С появлением станков с ЧПУ и программных продуктов автоматизации технологической подготовки производства возникли новые возможности управления процессом обработки по априорной, текущей и апостериорной информации [1]. Поскольку погрешность, вызванная упругими деформациями ТОС зависит от многих параметров процесса резания, способа установки детали, жесткости элементов станка, которые затруднительно определить априори, а также учитывая сложность измерения фактического размера детали непосредственно в месте обработки для применения управления по текущей информации, то наиболее подходящим методом управления для повышения точности обработки следует признать управление по апостериорной информации. Однако, этот метод практически не используется для повышения точности обработки путем коррекции формообразующей траектории ввиду отсутствия соответствующих методик и алгоритмов. Поэтому проблема разработки методов повышения точности обработки путем компенсации упругих деформаций в управляющей программе станков с ЧПУ является актуальной.

Постановка задачи

Разработать методику и соответствующие алгоритмы управления для компенсации погрешности токарной обработки, вызванной упругими деформациями ТОС путем коррекции формообразующей траектории в управляющей программе станка с ЧПУ.

Основное содержание

Предлагается следующая методика расчета коррекции формообразующей траектории для компенсации погрешностей, вызванных упругими деформациями ТОС. Согласно рабочей гипотезе, положенной в основу метода, в погрешности обработки содержится вся необходимая для коррекции информация. Эта информация является апостериорной и может быть получена при специальной обработке результатов измерений обработанной детали. С целью использования такой информации для коррекции формообразующей траектории можно рекомендовать два подхода. Первый заключается в использовании скорректированной управляющей программы для обработки следующей детали и может применяться при наличии серийного производства [2]. Второй подход состоит в том, что весь припуск на обработку разбивается на две равные части, после первого прохода с глубиной резания, равной половине припуска, измеряют фактическое значение контролируемой координаты (например, диаметра) и, используя полученную информацию, выполняют обработку на втором проходе по скорректированной формообразующей траектории. Такой подход рекомендуется применять при

обработке крупногабаритных, ответственных деталей в единичном производстве, когда потери времени на измерение вполне оправданы.

Сущность предлагаемого метода иллюстрируется на рис.1, где заготовка радиусом R_3 обрабатывается до размера детали радиус R_0 за два прохода. Заданная в программе ЧПУ глубина резания на первом проходе обозначена H_{31} , при этом резец установлен в положение, обозначенное $1'$, а в силу упругих деформаций при обработке он занимает положение, обозначенное 1 и фактическая глубина $H_{\phi 1}$ резания будет отличаться от заданной. Коррекция состоит в определении заданной глубины резания H_{32} на втором проходе, чтобы обеспечить выполнение заданного размера детали.

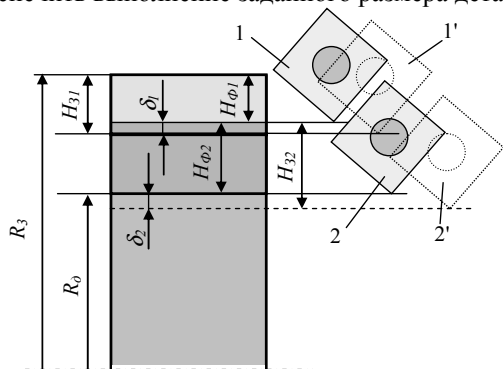


Рис. 1. Схема срезания припуска за два прохода

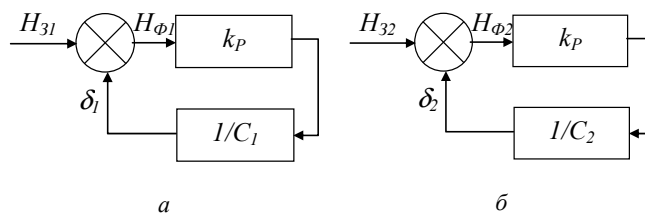


Рис. 2. Структурные схемы ТОС на первом (а) и втором (б) проходе

Обработка выполняется в замкнутой технологической обрабатывающей системе (ТОС), которая, с учетом обработки в два прохода, может быть представлена структурными схемами, показанными на рис. 2.

Из структурной схемы ТОС на первом проходе (рис. 2, а) можно получить следующее соотношение:

$$\frac{H_{\phi 1}}{H_{31}} = \frac{1}{1 + k_P / C_1}, \quad (1)$$

где $H_{\phi 1}$ и H_{31} – фактическая и заданная глубина резания на первом проходе, k_P – коэффициент линеаризованной зависимости силы резания от глубины, C_1 – приведенная жесткость ТОС на первом проходе.

Анализ полученной зависимости показывает, что при известной заданной глубине и измеренной фактической глубине резания (рассчитывается как разность заданной глубины и отклонения измеренного диаметра после первого прохода от теоретического):

$$H_{\phi 1} = H_{31} - \delta_1, \quad (2)$$

можно определить соотношение:

$$k_1 = \frac{k_P}{C_1} = \frac{H_{31}}{H_{\phi 1}} - 1. \quad (3)$$

Для выполнения требуемого размера детали (R_0 на рис.1) необходимо задать такую глубину резания на втором проходе, чтобы $H_{\phi 2} = H_{31} + \delta_1$. Из структурной схемы ТОС на втором проходе имеем:

$$\frac{H_{\phi 2}}{H_{32}} = \frac{1}{1 + k_P / C_2}. \quad (4)$$

Из структурной схемы ТОС на первом проходе можно получить формулу для расчета отклонения с учетом зависимости (3):

$$\delta_1 = \frac{H_{31} k_1}{1 + k_1}. \quad (5)$$

После подстановки (2) и (5) в (4) и несложных алгебраических преобразований получаем зависимость для расчета заданной глубины резания на втором проходе:

$$H_{32} = H_{31} \left(1 + \frac{k_1}{1 + k_1} \right) \left(1 + \frac{k_1}{k_C} \right), \quad (6)$$

где $k_C = C_2 / C_1$ – коэффициент изменения жесткости ТОС на втором проходе.

При обработке деталей на токарных станках жесткость ТОС изменяется в функции координаты X и зависит от способа установки заготовки и ее упругих свойств. Для определения такой зависимости можно воспользоваться схемой по рис.3 и методикой, изложенной в [3].

Формула для определения приведенной жесткости, как обратной величины податливости по координате X , имеет вид:

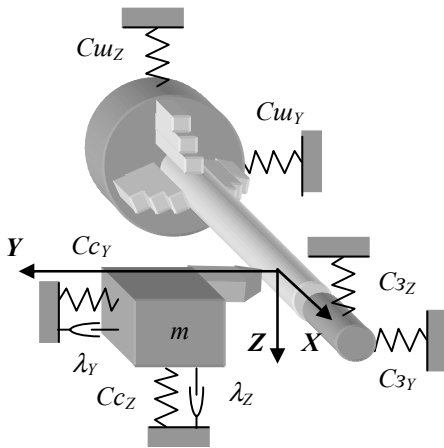


Рис. 3. Динамическая модель ТОС

$$C_y = \frac{l_0^2 C_{uy} C_{cy} C_{zy} 3EJ}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}, \tag{7}$$

где $a_1 = (l_0 - x)^2 C_{cy} C_{zy} 3EJ$; $a_2 = x^2 C_{uy} C_{cy} 3EJ$; $a_3 = l_0^2 C_{uy} C_{zy} 3EJ$; $a_4 = x^2 (l_0 - x)^2 l_0 C_{uy} C_{cy} C_{zy}$

Приведенная жесткость по координате Z определяется по аналогичным зависимостям, но в них изменяются индексы при соответствующих жесткостях в формулах (7). С учетом размерностей в зависимости (7) используется следующая формула для расчета EJ:

$$EJ = 3125\pi(2R_0)^4 \tag{8}$$

Таким образом, зависимость (6), по которой рассчитывается скорректированная управляющая программа на втором проходе, даже для простых форм деталей (например, цилиндр) превращается в функцию, а для расчета управляющей программы необходим компьютер.

Для теоретической проверки предложенного метода управления по апостериорной информации была разработана прикладная программа, которая позволяет моделировать все этапы предложенного метода. Моделирование выполняется в соответствии с разработанной математической моделью, учитывающей изменение приведенных жесткостей ТОС и дополнено математической моделью процесса резания с учетом его замкнутости [3]:

$$\begin{cases} H_\phi = H_3 - \delta_y - \delta_z \\ P_z = C_P H_\phi^{x_p} S^{y_p} V^{n_p} \\ P_{xy} = 0,6 P_z \\ P_y = \sqrt{P_{xy}^2 / (1 + \tan^2 \phi)} \\ \delta_y = P_y / C_y \\ \delta_z = \sqrt{R_0^2 + (P_z / C_z)^2} - R_0 \end{cases}, \tag{9}$$

где P_z , P_{xy} , P_y – тангенциальная, горизонтальная и радиальная составляющие силы резания, ϕ - главный угол в плане инструмента, C_P , x_p , y_p , n_p – эмпирические коэффициент и показатели степени, зависящие от материала заготовки, δ_y , δ_z - упругие деформации ТОС в направлении осей Y и Z соответственно.

В графическом окне 1 интерфейса программы (рис.4) представляется анимация процесса обработки с указанием этапа, а на виртуальном осциллографе 2 отображаются его характеристики. На рис.4 показан этап моделирования первого прохода, где линией 3 показано изменение заданной глубины H_{z1} резания на первом проходе (постоянная величина – правая шкала), а линией 4 – изменение погрешности, вызванной упругими деформациями ТОС (левая шкала). По оси абсцисс осциллограммы – координата Z в соответствии с системой координат, принятой на станке с ЧПУ.

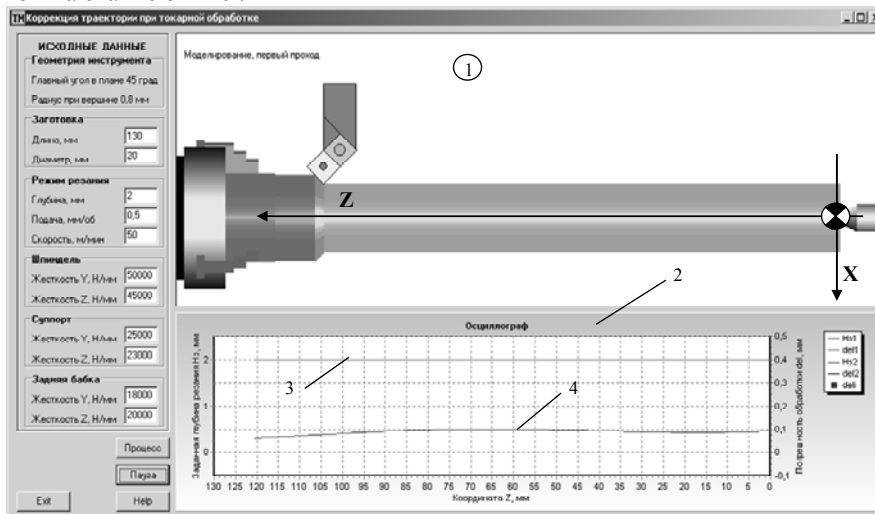


Рис. 4. Интерфейс прикладной программы

Согласно разработанному методу после первого прохода выполняется измерение полученного диаметра с выбранным шагом (рис.5). Шаг устанавливается в окне 1 интерфейса, а измеренные значения отклонений показаны квадратами 2 на линии упругих деформаций. Полученный массив данных обрабатывается специальным алгоритмом и преобразуется в сплайн. Таким образом, для дальнейших расчетов будет использоваться массив данных, представляющих форму отклонений независимо от шага измерений.

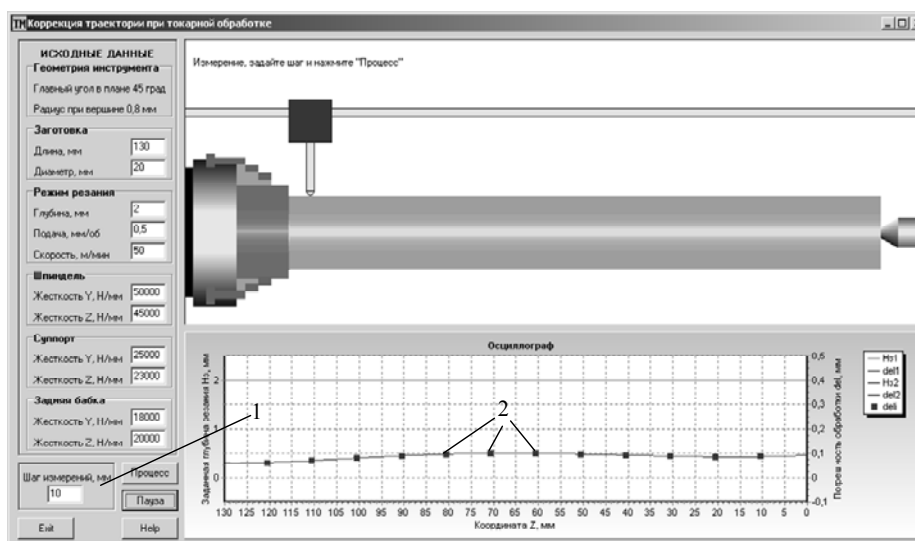


Рис. 5. Интерфейс прикладной программы – этап измерений

Наконец, рассчитывается массив значений формообразующей траектории по представленной выше математической модели и выполняется моделирование второго прохода (рис.6). На этом этапе в окне осциллографа отображаются следующие графики: линия 1 – заданная на первом проходе глубина резания, линия 2 – заданная на втором проходе глубина резания, линия 3 – погрешность обработки на первом проходе с отметками измеренных значений, линия 4 – погрешность обработки на втором проходе. Как видно из результатов моделирования разработанная методика позволяет полностью устранить погрешность обработки, вызванную упругими деформациями ТОС.

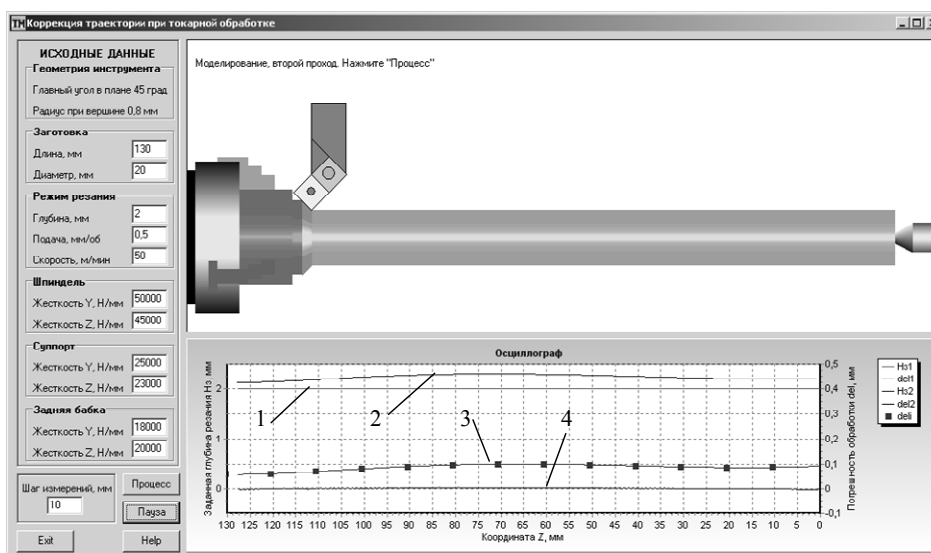


Рис. 6. Интерфейс прикладной программы – второй проход

Выводы

1. Разработанный метод повышения точности токарной обработки на станках с ЧПУ путем коррекции формообразующей траектории получил теоретическое подтверждение своей эффективности, однако нуждается в экспериментальной проверке. Разработанный программный продукт может быть использован для формирования управляющей программы станка с ЧПУ.

2. Поскольку метод предусматривает обработку, как минимум в два прохода, с промежуточным контролем результатов, то его использование целесообразно при изготовлении крупногабаритных, ответственных деталей, где неизбежные потери времени компенсируются выигрышем в точности обработки.

3. Разработанный метод и принципы составления математической модели могут быть использованы и для обработки деталей сложной формы, в том числе и при фрезеровании на станках с ЧПУ.

Abstract. *New method for increase of accuracy of lathe treatment, which consists in a hypothesis that all of required a posteriori information about the cutting process, machine-tool and instrument, necessary for forming of control, is contained in the machining detail are presented in the paper. It is suggested to cut away all of allowance for two passage-ways, after the first passage-way to execute measuring of detail form and based on its results to calculate the adjusted trajectory on the second final passage-way. For the calculation of the adjusted trajectory a mathematical model and proper algorithm are developed. The design of the offered method confirmed correctness of developed method fully. Practical verification and development of industrial software product is planned for realization of the method on CNC machine-tools. It is recommended to apply a method for a treatment of big, responsible details or non-rigid details with high demands of accuracy.*

Keywords: *correction of shape-generating trajectory, control on a posteriori information, CNC lathes.*

Анотація. *Представлений новий підхід до підвищення точності токарної обробки, який полягає у гіпотезі про те, що вся необхідна апостеріорна інформація про процес різання, верстат та інструмент, необхідна для формування управління, міститься в обробленій деталі. Запропоновано зрізувати весь припуск за два проходи, після першого проходу виконувати виміри форми деталі та за їх результатами формувати скоректовану траєкторію на другому, заключному ході. Для розрахунку скоректованої траєкторії розроблена математична модель та відповідний алгоритм. Моделювання запропонованого методу повністю підтвердило коректність розробленої методики. Запланована практична перевірка та розробка промислового програмного продукту для реалізації методу на верстатах з ЧПК. Рекомендується застосовувати метод при обробці великогабаритних відповідальних деталей, або нежорстких деталей з високими вимогами за точністю.*

Ключові слова: *корекція формуючої траєкторії, управління за апостеріорною інформацією, токарні верстати з ЧПК.*

Библиографический список использованной литературы

1. Петраков Ю.В. Развитие САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ: Монографія. – К.: Січкара, 2011. – 220с.
2. Петраков Ю.В. Методи управління точністю оброблення різанням: Сб. Вестник Национального технического университета Украины «КПИ», №48, 2006.-с.102-110.
3. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Автоматическое управление процессами резания: учебное пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2011.-408с.

References

1. Petrakov Y.V., Rozvitok CAM-sistem avtomatizirovanogo programuvanna verstativ z CNC: Monografia. Kyiv: Sichkar, 2011. 220p.
2. Petrakov Y.V. Metody upravlinna tochnistu obrobenna rizannam. Zb. Vestnik Nacionalnogo technicheskogo universitetu Ukrainy «KPI», No 48, 2006.p.102-110.
3. Petrakov Y.V., Drachev O.I. Avtomaticheskoe upravlenie processami rezania: uchebnoe posobie. Stary Oskpl: TNT, 2011. 408p.