

УДК 621.9.06

И.А. КАШТАЛЬЯН, д-р техн. наук; В.К. ШЕЛЕГ, член-корр. НАН Беларуси;
Б. ОРУКАРИ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

**ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ
НА ДВУХСУППОРТНЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ
ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Рассмотрена задача повышения производительности двухсуппортных токарных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) путем рационального совмещения технологических переходов. Описана методика прогнозной оценки точности обработки при независимом управлении суппортами. Приведены результаты экспериментальных исследований точности размеров и формы нежестких заготовок деталей машин, обработанных двумя резами совместно с включением в процесс резания кинематической неустойчивости.

Ключевые слова: числовое программное управление, независимое управление, совмещение переходов, кинематическая неустойчивость, производительность, точность

Введение. Резервы эффективного использования двухсуппортных токарных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) находятся в рациональном совмещении обработки поверхностей заготовки при общей частоте вращения шпинделя. Причем число вариантов совмещения может существенно возрасти, если на станке будет реализована функция независимого управления суппортами. На двухсуппортном вертикальном патронном полуавтомате мод. 1Ф734ФЗ, оснащенный микропроцессорным устройством с ЧПУ, данная задача управления решена путем включения в состав технологического программного обеспечения программного модуля, реализующего алгоритм независимого управления координатными перемещениями [1]. По данному алгоритму согласование начала отработки обоих управляющих программ (для правого и левого суппортов) осуществляется с помощью признака синхронизации Н. В управляющей программе (УП) для правого (левого) суппорта под адресом Н задается номер кадра, с которого начинается отработка УП для левого (правого) суппорта. Использование этой функции управления позволяет обеспечить оптимальное сочетание рабочих и вспомогательных ходов для правого и левого суппортов при их совместной работе.

Наибольший эффект от совместного точения двумя резами, установленными на разных суппортах, может быть получен при изготовлении нежестких деталей (кроме увеличения производительности обработки значительно повышается точность формы детали в продольном сечении за счет уравнивания радиальных сил резания). Настройку резов осуществляют по одной из известных схем: с делением глубины резания; с делением подачи [2].

Указанные схемы точения имеют общий недостаток, который обусловлен возникновением вибраций вследствие взаимного влияния реализуемых процессов резания друг на друга (при совпадении частот вынужденных колебаний различных процессов резания возникают резонансные явления). Для исключения этого недостатка целесообразно для одного из процессов обеспечить управляемое закономерное изменение уровня вибраций (например, путем включения в один из процессов резания кинематической неустойчивости).

Для этого в технологическое программное обеспечение устройства ЧПУ был включен модуль, позволяющий периодически увеличивать подачу от S_{\min} до S_{\max} , а потом снижать ее до первоначального значения [3]. Изменение подачи между ее пиковыми значениями (далее модулированное изменение подачи) производится приращениями величиной ΔS по мере обработки участков Δl между приращениями: устройство ЧПУ поочередно реализует зависимость $S_{\max} = S_{\min} + n_s \Delta S$ и зависимость $S_{\min} = S_{\max} - n_s \Delta S$, где n_s — число приращений скорости подачи при ее изменении от S_{\min} до S_{\max} .

При совместной обработке нежесткой заготовки двумя режущими инструментами с включением в процесс резания модулированной подачи происходит изменение механизма действия ряда причин, оказывающих влияние на точность обработки. Прежде всего это относится к упругим деформациям технологической системы. Однако существующие аналитические методы прогнозной оценки точности не учитывают все возможные варианты совмещения технологических переходов и являются не точными [4, 5]. В связи с этим каждый раз при выборе рационального варианта совмещения технологических переходов возникает задача прогнозной оценки точности обработки. Вместе с тем представляется, что данная задача может быть успешно решена на основе совместного использования аналитических методов прогнозирования и численных расчетов.

Прогнозная оценка точности обработки. Технологическая система «станок — приспособление — инструмент — заготовка» является упругой системой, деформации которой в процессе резания обуславливают возникновение систематических и случайных погрешностей обработки. Фактически точность выполняемых размеров и погрешность формы поверхности определяются механикой силового взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемой заготовки [6]. При совместной обработке двумя режущими инструментами, установленными на разных суппортах двухсуппортного токарного станка с ЧПУ, это взаимодействие имеет некоторые особенности, которые обусловлены взаимовлиянием друг на друга различных процессов резания. Причем степень этого

взаимовлияния на формирование поля рассеяния выполняемого размера (размеров) в значительной мере определяется схемой совмещения переходов, при выборе и анализе которой следует руководствоваться следующими основными соображениями.

1. Технологическая система рассматривается состоящей из трех подсистем: подсистема 0 «шпиндель — патрон — заготовка»; подсистема 1 «правый суппорт — державка — инструмент»; подсистема 2 «левый суппорт — державка — инструмент».

2. Оба суппорта равноценны по своим функциональным возможностям.

3. Суппорт, на котором установлен режущий инструмент, формирующий выполняемый размер, принимается за основной. Дополнительным будет считаться тот суппорт, который влияет на искажение выполняемого размера через воздействие на заготовку.

4. Искажение выполняемого размера формируется векторным сложением трех перемещений: перемещения подсистемы основного суппорта и двух перемещений подсистемы заготовки (от действия силы резания инструмента, установленного на основном и дополнительном суппортах).

Поскольку сила резания при токарной обработке является вектором в трехмерном пространстве и упругие перемещения технологических подсистем под действием этой силы также описывается пространственным вектором, то можно перейти к векторному описанию деформаций технологической системы при ее силовом нагружении. Причем целесообразно при прогнозной оценке вариантов совмещения производить декомпозицию двухинструментальной технологической системы на две одноинструментальные (для правого и левого суппортов). Фактически три подсистемы, входящие в состав двухинструментальной технологической системы, делятся на две группы одноинструментальных подсистем. Причем подсистема 0 «шпиндель — патрон — заготовка» в равной степени относится к подсистемам первой и второй группы (первая группа — подсистемы 1, 2; вторая группа — подсистемы 0, 2).

Каждая из подсистем (рисунок 1) в определенной степени влияет на искажение выполняемого размера. В результате расчетное значение диаметра заготовки D_p не совпадает с его фактическим значением D_ϕ .

Поскольку в пространстве тело имеет шесть степеней свободы, характеристики податливости технологической системы могут быть представлены в виде матрицы.

Для подсистемы 0 «шпиндель — патрон — заготовка» матрица податливости имеет вид

$$\omega^0 = \begin{Bmatrix} \omega_{xx}^0 & \omega_{xy}^0 & \omega_{xz}^0 \\ \omega_{yx}^0 & \omega_{yy}^0 & \omega_{yz}^0 \\ \omega_{zx}^0 & \omega_{zy}^0 & \omega_{zz}^0 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где $\omega_{xx}^0, \omega_{yy}^0, \omega_{zz}^0$ — перемещения в направлении оси X соответственно от единичной силы P_x, P_y, P_z ; $\omega_{yx}^0, \omega_{xy}^0, \omega_{yz}^0$ — перемещения в направлении оси Y соответственно от единичной силы P_x, P_y, P_z ; $\omega_{zx}^0, \omega_{zy}^0, \omega_{zz}^0$ — перемещения в направлении оси Z соответственно от единичной силы P_x, P_y, P_z .

Матрица податливости для подсистемы 1 «правый суппорт — державка — инструмент»:

$$\omega^1 = \begin{Bmatrix} \omega_{xx}^1 & \omega_{xy}^1 & \omega_{xz}^1 \\ \omega_{yx}^1 & \omega_{yy}^1 & \omega_{yz}^1 \\ \omega_{zx}^1 & \omega_{zy}^1 & \omega_{zz}^1 \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

Матрица податливости для подсистемы 2 «левый суппорт — державка — инструмент»:

$$\omega^2 = \begin{Bmatrix} \omega_{xx}^2 & \omega_{xy}^2 & \omega_{xz}^2 \\ \omega_{yx}^2 & \omega_{yy}^2 & \omega_{yz}^2 \\ \omega_{zx}^2 & \omega_{zy}^2 & \omega_{zz}^2 \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

В строках матриц (2) и (3), как и в матрице (1), указаны соответствующие перемещения от единичных сил P_x, P_y, P_z .

Используя матрицы податливости ω^0, ω^1 и ω^2 , получены зависимости для пространственных перемещений \bar{f}_n^0 и \bar{f}_n^1 в подсистеме 0, а также \bar{f}_n^1 и \bar{f}_n^2 в подсистемах 1 и 2, соответственно.

$$\text{Подсистема 0: } \bar{f}_n^0 = \omega^0 \bar{P}^{01}; \quad (4)$$

$$\bar{f}_n^0 = \omega^0 \bar{P}^{02}. \quad (5)$$

$$\text{Подсистема 1: } \bar{f}_n^1 = \omega^1 \bar{P}^{10}.$$

$$\text{Подсистема 2: } \bar{f}_n^2 = \omega^2 \bar{P}^{20},$$

где \bar{P}^{01} и \bar{P}^{02} — сила воздействия подсистемы 1 и подсистемы 2 на подсистему 0; \bar{P}^{10} и \bar{P}^{20} — сила воздействия подсистемы 0 на подсистему 1 и 2, соответственно.

Поскольку $\bar{P}^{01} = -\bar{P}^{10} = \bar{P}_{n2}^0$, а $\bar{P}^{02} = -\bar{P}^{20} = \bar{P}_n^0$, то для суммарного перемещения \bar{f}_n^{01} вершины резца, установленного на правом суппорте, относительно оси заготовки можно записать

$$\bar{f}_n^{01} = \bar{f}_n^1 - \bar{f}_n^0 = \omega^1 \bar{P}^{10} - \omega^0 \bar{P}^{01} = (\omega^1 + \omega^0) \bar{P}_n. \quad (6)$$

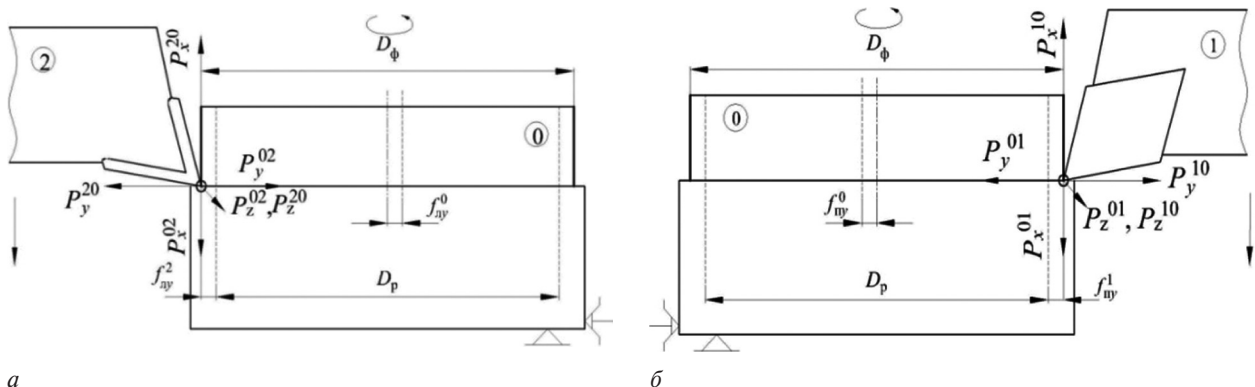


Рисунок 1 — Пространственные расчетные схемы упругих перемещений технологических подсистем первой (а) и второй (б) группы

Аналогично для вершины резца, установленного на левом суппорте, суммарное перемещение $\bar{f}_л^{02}$ будет равно

$$\bar{f}_л^{02} = \bar{f}_л^2 - \bar{f}_л^0 = \omega^2 \bar{P}^{20} - \omega^0 \bar{P}^{02} = (\omega^2 + \omega^0) \bar{P}_л. \quad (7)$$

Для аналитического определения суммарного перемещения вершины резца, установленного на одном из суппортов станка, целесообразно ввести объединенную матрицу податливости ω^{01} для первой группы подсистем ($\omega^{01} = \omega^1 + \omega^0$) и объединенную матрицу податливости ω^{02} для подсистем второй группы ($\omega^{02} = \omega^2 + \omega^0$):

$$\omega^{01} = \omega^1 + \omega^0 = \begin{Bmatrix} \omega_{xx}^1 + \omega_{xx}^0 & \omega_{xy}^1 + \omega_{xy}^0 & \omega_{xz}^1 + \omega_{xz}^0 \\ \omega_{yx}^1 + \omega_{yx}^0 & \omega_{yy}^1 + \omega_{yy}^0 & \omega_{yz}^1 + \omega_{yz}^0 \\ \omega_{zx}^1 + \omega_{zx}^0 & \omega_{zy}^1 + \omega_{zy}^0 & \omega_{zz}^1 + \omega_{zz}^0 \end{Bmatrix};$$

$$\omega^{02} = \omega^2 + \omega^0 = \begin{Bmatrix} \omega_{xx}^2 + \omega_{xx}^0 & \omega_{xy}^2 + \omega_{xy}^0 & \omega_{xz}^2 + \omega_{xz}^0 \\ \omega_{yx}^2 + \omega_{yx}^0 & \omega_{yy}^2 + \omega_{yy}^0 & \omega_{yz}^2 + \omega_{yz}^0 \\ \omega_{zx}^2 + \omega_{zx}^0 & \omega_{zy}^2 + \omega_{zy}^0 & \omega_{zz}^2 + \omega_{zz}^0 \end{Bmatrix}.$$

Тогда уравнения (4)–(7), используемые для определения $\bar{f}_п^0, \bar{f}_л^0, \bar{f}_п^{01}, \bar{f}_л^{02}$, примут вид:

$$\bar{f}_п^0 = \omega^0 \bar{P}_п; \quad \bar{f}_л^0 = \omega^0 \bar{P}_л; \quad \bar{f}_п^{01} = \omega^{01} \bar{P}_п; \quad \bar{f}_л^{02} = \omega^{02} \bar{P}_л$$

или соответственно в развернутой форме:

$$\begin{pmatrix} f_{пx}^{01} \\ f_{пy}^{01} \\ f_{пz}^{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{xx}^{01} & \omega_{xy}^{01} & \omega_{xz}^{01} \\ \omega_{yx}^{01} & \omega_{yy}^{01} & \omega_{yz}^{01} \\ \omega_{zx}^{01} & \omega_{zy}^{01} & \omega_{zz}^{01} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{пx} \\ P_{пy} \\ P_{пz} \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} f_{лx}^{02} \\ f_{лы}^{02} \\ f_{лz}^{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{xx}^{02} & \omega_{xy}^{02} & \omega_{xz}^{02} \\ \omega_{yx}^{02} & \omega_{yy}^{02} & \omega_{yz}^{02} \\ \omega_{zx}^{02} & \omega_{zy}^{02} & \omega_{zz}^{02} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{лx} \\ P_{лы} \\ P_{лz} \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} f_{пx}^0 \\ f_{пy}^0 \\ f_{пz}^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{xx}^0 & \omega_{xy}^0 & \omega_{xz}^0 \\ \omega_{yx}^0 & \omega_{yy}^0 & \omega_{yz}^0 \\ \omega_{zx}^0 & \omega_{zy}^0 & \omega_{zz}^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{пx} \\ P_{пy} \\ P_{пz} \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} f_{лx}^0 \\ f_{лы}^0 \\ f_{лz}^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{xx}^0 & \omega_{xy}^0 & \omega_{xz}^0 \\ \omega_{yx}^0 & \omega_{yy}^0 & \omega_{yz}^0 \\ \omega_{zx}^0 & \omega_{zy}^0 & \omega_{zz}^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{лx} \\ P_{лы} \\ P_{лz} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $f_{пx}^0, f_{пy}^0, f_{пz}^0, f_{лx}^0, f_{лы}^0, f_{лz}^0, f_{пx}^{01}, f_{пy}^{01}, f_{пz}^{01}, f_{лx}^{02}, f_{лы}^{02}, f_{лz}^{02}$ — координатные перемещения в подсистемах технологической системы; $P_{пx}, P_{пy}, P_{пz}, P_{лx}, P_{лы}, P_{лz}$ — составляющие силы резания при обработке правым и левым суппортом станка.

Представленные матричные уравнения (8)–(11) определения податливости положены в основу методики прогнозирования точности обработки при решении задачи выбора рационального варианта совмещения технологических переходов на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ. Обобщенный алгоритм определения максимального и минимального значений искажения размеров при этом заключается в следующем.

1. На основе экспериментальных данных строятся матрицы податливости $\omega^0, \omega^1, \omega^2$ для подсистем 0, 1, 2 токарного станка с ЧПУ, соответственно.

2. Строятся объединенные матрицы податливости ω^{01} для правого и ω^{02} для левого суппорта.

3. Формируется массив допустимых схем совмещения при совместной обработке заготовки двумя режущими инструментами [7].

4. В соответствии с выбранной схемой совмещения определяется какая из двух групп технологических подсистем является основной (основной суппорт), а какая дополнительная.

5. Для выбранного варианта совмещения строится вектор силы резания для правого $\bar{P}_п$ и левого $\bar{P}_л$ суппорта.

6. Определяется вектор перемещения контактной точки резца с обрабатываемой поверхностью в направлении выполняемого размера от силового взаимодействия подсистем основного суппорта с подсистемой шпинделя ($\bar{f}_п^{01}$ или $\bar{f}_л^{02}$).

7. Определяется вектор перемещения шпиндельного узла в направлении размера, выполняемого основным суппортом, от силы воздействия на него подсистемы дополнительного суппорта.

8. Определяется результирующее перемещение контактной точки резца в направлении размера, выполняемого основным суппортом (выполняется процедура сложения векторов по п. 6 и п. 7).

Для экспериментальной проверки предложенной методики прогнозирования точности обработки при совмещении технологических переходов были построены матрицы податливости для подсистем двухсупортного токарного станка с ЧПУ мод. 1А734Ф3. Нагружение каждой из подсистем осуществлялось по трем координатным направлениям с помощью гидравлического динамометра. В качестве измерительного устройства упругих перемещений был использован окуляр-микрометр МОЭ-4-15 НПО «Планар» (Беларусь) с ценой деления 0,1 мкм.

Результаты экспериментальных исследований. Для выявления и анализа отклонений диаметральных и продольных размеров заготовок, обработанных в условиях независимого управления двумя суппортами, и погрешности формы в поперечном сечении были использованы методы математической статистики [8]. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием станка мод. 1А734Ф3, оснащенного устройством ЧПУ с функцией независимого управления суппортами и функцией модулированного изменения подачи. Обработывалась наружная поверхность втулок из стали 40ХН (длина втулки 145 мм, наружный диаметр 150 мм, внутренний 135 мм) при консольном закреплении в патроне и частоте вращения шпинделя $n_{ш} = 255$ об/мин. Обработка велась резцами с механическим креплением пластины твердого сплава Т15К6. Геометрические параметры режущей части: $\gamma = 8^\circ; \alpha = 12^\circ; \varphi = 95^\circ; \varphi_1 = 5^\circ; r_b = 0,8$ мм. В качестве СОЖ применялась эмульсия НГЛ-205. Наружная поверхность партии заготовок обрабатывалась точением с делением глубины резания. Черновой рабочий ход с глубиной резания $t = 2,5$ мм и скоростью резания $v = 120,9$ м/мин. выполнялся резцом, установленным в револьверной головке правого суппорта. Резец, установленный в револьверной головке левого суппорта, выполнял чистовой рабочий ход с глубиной резания $t = 0,5$ мм. Скорость резания при этом была равна 120,1 м/мин. Заготовки партии были разбиты на три группы. Точение наружной поверхности заготовок первой группы осуществлялось последовательно (после черновой обработки наружной поверхности втулки резцом, ус-

тановленным на правом суппорте, включался в работу чистовой резец, установленный на левом суппорте). Наружная поверхность заготовок второй группы обрабатывалась совместно двумя резцами (рабочие хода для обоих суппортов были синхронизированы). При обработке заготовок третьей группы черновой рабочий ход выполнялся с модулированной подачей, среднее значение которой было равно подаче, с которой перемещался чистовой резец.

Из каждой группы обработанных заготовок была взята выборка большего объема $n_d = 100$. Измерение диаметральных размеров осуществлялось микрометром МР 0220 (цена деления 2 мкм). Для измерения продольных размеров был использован индикатор 1МИГ (цена деления 1 мкм). Погрешность формы в поперечном сечении определялась как разность между максимальным и минимальным диаметральными размерами

Основные статистические характеристики распределений размеров и формы (среднее арифметическое \bar{X} и среднее квадратическое отклонение s_2) вычислялись методом моментов. Распределения размеров подсчитывались при интервале $h = 5$ единиц, погрешностей формы при интервале $h = 1$ единица; единица измерения была равна 0,001 мм. Результаты расчетов сведены в таблицу.

Эмпирические распределения отклонений размеров и формы сравнивались с распределением по закону Гаусса. Удовлетворительность соответствия проверялась по критериям согласия χ^2 [8]. Во всех случаях гипотеза о том, что выборка принадлежит нормально распределенной генеральной совокупности, не отвергалась. Некоторые практические и теоретические кривые распределения погрешностей размеров и формы представлены на рисунках 2–4.

По методике расчетов, предложенной в работе [9], рассеяние погрешностей обработки деталей определяется как сумма рассеяния погрешностей размеров Δ_p и погрешностей формы Δ_ϕ (методика допустима, когда погрешность формы по длине обработки не изменяется)

$$\Delta = \Delta_p + \Delta_\phi.$$

Влиянием погрешности формы Δ_ϕ можно пренебречь, если величина среднего квадратического откло-

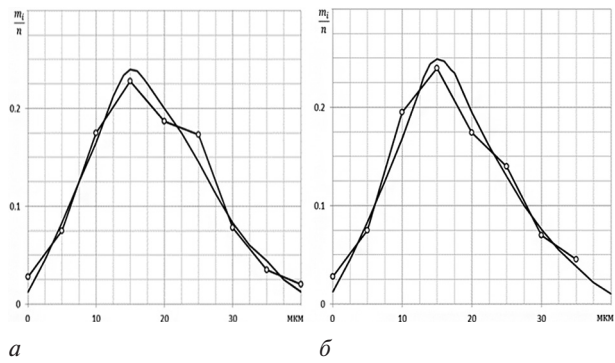


Рисунок 2 — Практические и теоретические кривые распределения отклонений диаметральных размеров: а — оба рабочих хода выполнены с постоянной подачей; б — черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом

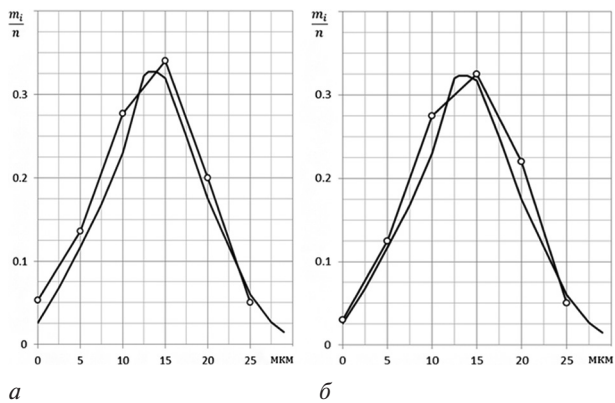


Рисунок 3 — Практические и теоретические кривые распределения отклонений продольных размеров: а — оба рабочих хода выполнены с постоянной подачей; б — черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом

нения этих погрешностей составляет не более 30% от величины среднего квадратического отклонения погрешностей размеров σ_p . При выполнении чернового и чистового рабочих ходов совместно с постоянной подачей величина σ_ϕ не превышает 10% от σ_p . Поэтому фактическое поле рассеяния погрешностей обработки $\Delta = 6\sigma$.

Таблица — Статистические характеристики погрешностей размеров и формы деталей, изготовленных при совместной работе двумя суппортами

Контролируемый параметр	Характеристика схемы обработки при точении двумя резцами с делением глубины резания	\bar{X} , мм	s^2 , мм
Диаметральный размер	Черновой и чистовой рабочие хода выполнены последовательно	0,0167	0,0084
	Черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом	0,0168	0,0086
	Оба рабочих хода выполнены совместно с постоянной подачей	0,0182	0,0091
Продольный размер	Черновой и чистовой рабочие хода выполнены последовательно	0,0129	0,0059
	Черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом	0,0133	0,0059
	Оба рабочих хода выполнены совместно с постоянной подачей	0,0131	0,0060
Форма в поперечном сечении	Черновой и чистовой рабочие хода выполнены последовательно	0,0021	0,0008
	Черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом	0,0022	0,00091
	Оба рабочих хода выполнены совместно с постоянной подачей	0,0024	0,0009

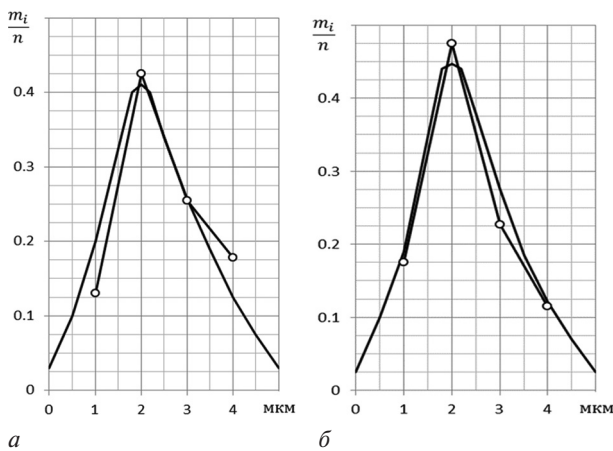


Рисунок 4 — Практические и теоретические кривые распределения погрешностей формы в поперечном сечении:
 а — оба рабочих хода выполнены с постоянной подачей;
 б — черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом

Для учета погрешности определения среднего квадратического отклонения s^2 , зависящей от величины партии измеряемых деталей n_d , при подсчете σ целесообразно использовать зависимость

$$\sigma = p_{с.к.} s^2,$$

где $p_{с.к.}$ — коэффициент, учитывающий погрешность определения среднего квадратического отклонения в зависимости от размера партии измеренных деталей n_d .

Для $n_d = 100$ коэффициент $p_{с.к.} = 1,2$ [10]. Тогда при выполнении чернового рабочего хода с модулированной подачей $\sigma = 0,01032$ мм; $\Delta = 6\sigma = 0,062$ мм. При выполнении чистового и чернового рабочих ходов совместно с постоянной подачей $\sigma = 0,01092$ мм; $\Delta = 6\sigma = 0,066$ мм.

Оба торца детали, между которыми фиксировался продольный размер, обрабатывались с одной установки тем же подрезно-проходным резцом, что и цилиндрическая поверхность. Это позволило практически полностью исключить погрешность обработки, вызванную размерным износом инструмента.

С учетом погрешности определения среднего квадратического отклонения при размере партии измеренных заготовок $n_d = 100$ рассеяние погрешностей продольных размеров будет равно: при выполнении чернового рабочего хода с модулированной подачей $\Delta = 0,042$ мм; при совместном точении двумя резцами с постоянной подачей $\Delta = 0,043$ мм.

Установлено, что при точении двумя резцами совместно с делением глубины резания точность диаметральных и продольных размеров выше для варианта выполнения чернового рабочего хода с модулированной подачей. Данное явление обусловлено снижением уровня вибраций технологической системы за счет уменьшения вероятности возникновения резонансных явлений при наложении друг на друга однородных процессов резания. Фактически при выполнении чернового рабочего хода с включением в процесс резания кинематической нестабильности в результате наложения асинхронной силы, возникающей при изменении подачи, на систему, которая находится в колебательном движении, колебания гасятся, точность обработанной поверхности при этом возрастает.

Выводы. Включение в состав технологического программного обеспечения микропроцессорных устройств ЧПУ программного модуля, реализующего алгоритм модулированного изменения подачи, расширяет функциональные возможности технологического оборудования. Для токарных станков с независимым управлением суппортами это выражается в возможности создания схем совмещения, обеспечивающих повышение производительности и точности обработки при изготовлении нежестких деталей. Вследствие повышения устойчивости технологической системы к автоколебаниям в процессе точения двумя резцами (совместно) с делением глубины резания и сообщением черновому резцу модулированной подачи возрастает точность диаметральных и продольных размеров обработанных заготовок и соответствует 8-му качеству, что соответствует прогнозной оценке точности обработки, полученной по представленной в работе методике; погрешности формы поверхностей деталей обработанных двумя резцами совместно от схемы выполнения чернового рабочего хода практически не зависят.

Обозначения

S_{\min}, S_{\max} — нижнее и верхнее значения модулированной подачи соответственно; ΔS — приращение подачи; Δl — путь, пройденный режущим инструментом между приращениями подачи; n_s — число приращений скорости подачи при ее изменении от S_{\min} до S_{\max} ; Δ_p, Δ_ϕ — расчетный и фактический диаметры заготовки соответственно; $\omega_{xx}^0, \omega_{xy}^0, \omega_{xz}^0$ — перемещения в направлении оси X соответственно от единичной силы P_x, P_y, P_z ; $\omega_{yx}^0, \omega_{yy}^0, \omega_{yz}^0$ — перемещения в направлении оси Y соответственно от единичной силы P_x, P_y, P_z ; $\omega_{zx}^0, \omega_{zy}^0, \omega_{zz}^0$ — перемещения в направлении оси Z соответственно от единичной силы P_x, P_y, P_z ; $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ — матрицы податливости для подсистем 0, 1, 2 соответственно; \bar{f}_n^0 и \bar{f}_n^1 — пространственные перемещения в подсистеме 0; \bar{f}_n^1, \bar{f}_n^2 — пространственные перемещения в подсистемах 1 и 2 соответственно; \bar{P}^{01} и \bar{P}^{02} — сила воздействия подсистемы 1 и подсистемы 2 на подсистему 0 соответственно; \bar{P}^{10} и \bar{P}^{20} — сила воздействия подсистемы 0 на подсистему 1 и 2 соответственно; $\bar{f}_n^{01}, \bar{f}_n^{02}$ — суммарное перемещение вершины резца, установленного на правом и левом суппорте соответственно; ω_{01}, ω_{02} — объединенные матрицы податливости для первой и второй группы подсистем соответственно; $f_{nx}^0, f_{ny}^0, f_{nz}^0, f_{lx}^0, f_{ly}^0, f_{lz}^0, f_{px}^{01}, f_{py}^{01}, f_{pz}^{01}, f_{lx}^{02}, f_{ly}^{02}, f_{lz}^{02}$ — координатные перемещения в подсистемах технологической системы; $P_{nx}, P_{ny}, P_{nz}, P_{lx}, P_{ly}, P_{lz}$ — составляющие силы резания при обработке правым и левым суппортом станка; $n_{ш}$ — частота вращения шпинделя; $\gamma, \alpha, \phi, \phi_1, r_{ш}$ — геометрические параметры режущей части резца; \bar{X} — среднее арифметическое отклонение; s^2 — среднее квадратическое отклонение; n — объем выборки; h — интервал отклонения размеров; χ^2 — критерий согласия; Δ — суммарная погрешность; Δ_p — рассеяние погрешностей размеров; Δ_ϕ — рассеяние погрешностей формы; σ — среднее квадратическое отклонение погрешностей; σ_p — среднее квадратическое отклонение погрешностей размеров; σ_ϕ — среднее квадратическое отклонение погрешностей формы; $p_{с.к.}$ — коэффициент, учитывающий погрешность определения среднего квадратического отклонения в зависимости от размера выборки n_d .

Список литературы

1. Каштальян, И.А. Программная реализация функции независимого управления координатными перемещениями / И.А. Каштальян, В.К. Шелег, Б. Орукари // Автоматизация и роботизация процессов и производств: материалы научно-практического семинара, Минск, 13 февр. 2014 г. / редкол.: Ф.И. Пантелеенко [и др.]. — Минск, 2014. — С. 33–35.
2. Махаринский, Е.И. Основы технологии машиностроения: учебник. / Е.И. Махаринский, В.А. Горохов. — Минск: Выш. шк., 1997. — 423 с.
3. Каштальян, И.А. Дискретное управление процессами резания на токарных станках с числовым программным управлением / И.А. Каштальян, В.К. Шелег, Б. Орукари // Вес. НАН Беларусі, сер. фіз.-тэхн. навук. — 2015. — № 4. — С. 115–126.
4. Кошин, А.А. Аналитические основы моделей силового взаимодействия подсистем технологической системы в процессах обработки резанием / А.А. Кошин, Д.Н. Юсубов // Современные проблемы машиностроения и приборостроения: сб. науч. тр. — Баку: АзТУ, 2005. — С. 67–70.
5. Юсубов, Д.Н. Матричные модели точности в многоинструментальных двухсуппортных наладках / Д.Н. Юсубов // Вест. машиностроения. — 2009. — № 3. — С. 52–54.
6. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. — 16-е изд. — М.: КноРус, 2011. — 608 с.
7. Каштальян, И.А. Автоматизированный выбор рациональных вариантов совмещения переходов на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ / И.А. Каштальян, Б. Орукари, Д.Е. Артанович И.А. // Технология — Оборудование — Инструмент — Качество: тез. докл. междунар. науч.-практич. конф., Минск, 7– 8 апр. 2016 г. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. — Минск, 2016. — С. 86–88.
8. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справ. / М.Н. Степнов. — М.: Машиностроение, 1985. — 232 с.
9. Кораблев, П.А. Точность обработки на металлорежущих станках в приборостроении / П.А. Кораблев. — М.: Машиностроение, 1962. — 228 с.
10. Большов, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большов, Н.В. Смирнов. — М.: Наука, 1963. — 464 с.

Kashtalyan I.A., Sheleh V.K., Orukari B.

Dimensional and configuration precision of workpieces manufactured on four axis lathes with numerical control

The problem of improving performance of four-axis lathe machines with numerical control (CNC) by a rational combination of technological transitions is considered. A technique of predictive estimation of manufacturing precision with independent control of turrets is described. The results of experimental studies of dimensional and configuration precision of nonrigid workpieces processed with two cutters simultaneously with inclusion of kinematic instability in the cutting process are presented.

Поступил в редакцию 12.07.2017.