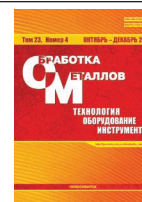




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Полнофакторная матричная модель точности выполняемых размеров на многоцелевых станках с ЧПУ

Низами Юсубов^{а, *}, Хейран Аббасова^б

Азербайджанский технический университет, пр. Гусейн Джавида, 25, г. Баку, AZ 1073, Азербайджан

^а <https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>, nizami.yusubov@aztu.edu.az, ^б <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>, abbasova.heyran@aztu.edu.az

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71

История статьи:

Поступила: 07 июля 2021
Рецензирование: 06 августа 2021
Принята к печати: 07 сентября 2021
Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Многоцелевые станки с ЧПУ
Точность обработки
Полнофакторная точностная модель
Поля рассеяния выполняемых размеров
Матрица податливости
Плоскопараллельная матрица податливости
Угловая матрица податливости

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из главных причин того, что на современных многоцелевых станках с ЧПУ не используются возможности многоинструментной обработки, является отсутствие рекомендаций по проектированию в этом направлении и соответственно по схемам наладки. Исследование возможностей многоинструментной обработки на многоцелевых станках составляет предмет настоящей работы. **Цель работы:** рассмотрена задача разработки полнофакторных матричных моделей точности размеров и их чувствительности к процессу обработки для повышения эффективности точности обработки с использованием технологических возможностей многоинструментной обработки на современных многоцелевых станках с ЧПУ. Для этого разработаны полнофакторные матричные модели полей рассеяния размеров, выполняемых на многоинструментных двухсуппортных наладках, с учетом нередко встречающихся на практике случаев обработки деталей с габаритными размерами, резко отличающимися в разных направлениях, и значительном влиянии поворотов обрабатываемой заготовки на погрешность обработки, особенно в направлениях с резко отличающимися габаритными размерами. **Результаты работы.** Разработанные точностные модели дают возможность рассчитать не только плоскопараллельные перемещения технологической системы для двухсуппортной наладки, но и угловые перемещения вокруг базовых точек с учетом совокупного влияния множества факторов – комплексной характеристики подсистем технологической системы (плоскопараллельная матрица податливости и угловая матрица податливости), геометрию режущего инструмента, величины затупления инструмента, режимов резания и т. д. В результате на базе разработанных точностных моделей возможно получение нескольких путей управления многоинструментной обработкой, включая усовершенствование структуры многоинструментных наладок, расчет предельных значений режимов резания. На основе разработанных полнофакторных матричных моделей возникла возможность разработки рекомендаций по проектированию наладок и созданию автоматизированной системы проектирования многоинструментной обработки для группы современных многоцелевых токарных станков с ЧПУ. **Область применения результатов.** Полученные результаты могут использоваться при создании математического обеспечения проектирования операций в системах автоматизированного проектирования, предусмотренных для многоинструментной многосуппортной обработки, выполняемой на многоцелевых станках. **Выводы.** Разработанные модели и методология моделирования точности обработки дают возможность повышать точность и эффективность одновременной обработки, прогнозировать точность обработки в пределах заданных условий.

Для цитирования: Юсубов Н.Д., Аббасова Х.М. Полнофакторная матричная модель точности выполняемых размеров на многоцелевых станках с ЧПУ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 6–20. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20.

Введение

Высокая стоимость современных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) на мировом рынке диктует необходимость ис-

пользования технологических возможностей этих станков на высоком уровне. Здесь большое значение имеет не только уменьшение времени обработки, но даже сведение до минимума вспомогательного времени. Одним из путей повышения производительности обработки на станках с ЧПУ является использование возможностей многоинструментной обработки на этих станках.

Многоинструментная обработка занимает в машиностроении важное место. Многоинстру-

*Адрес для переписки

Юсубов Низами Дамир, д.т.н., профессор
Азербайджанский технический университет,
пр. Гусейн Джавида, 25,
AZ 1073, г. Баку, Азербайджан
Тел.: +994 (55) 324 50 12, e-mail: nizami.yusubov@aztu.edu.az

ментные наладки, обладающие большими потенциальными возможностями по концентрации переходов, дают возможность выполнять все формообразующие технологические превращения многономенклатурных деталей на одной токарно-автоматной операции до термической обработки, при том, что в большинстве случаев они выполняют всю обработку, начиная от заготовки и заканчивая готовой деталью. Номенклатура токарных станков, работающих с многоинструментными наладками, достаточно широка. Однако анализ уровня использования возможностей многоинструментной обработки на многоцелевых станках с ЧПУ, проведенный на заводах, показал, что наладки с параллельной многоинструментной обработкой используются недостаточно [5, 7, 10–12]. По этой причине повышение эффективности использования технологических возможностей многоинструментной обработки на современных станках с ЧПУ является одной из проблем в машиностроении, ждущих своего решения.

Основной предпосылкой для решения возникшей проблемы является теория проектирования многоинструментной обработки с учетом возможностей современных станков с ЧПУ. Теория проектирования многоинструментной обработки на современных станках с ЧПУ построена на основе баланса взаимного влияния сил инструментов наладки с учетом возможностей движения инструментов по криволинейным траекториям, а также произвольного пространственного расположения инструментов в наладке. По этой причине в первую очередь важно иметь модели погрешностей обработки, учитывающие одновременное влияние всех составляющих сил резания всех инструментов наладки в многоинструментных наладках с пространственным расположением инструментов и упругие перемещения по всем координатным направлениям технологической системы. С учетом этого была создана матричная теория точности многоинструментной обработки [6]. Однако сформированные модели погрешности обработки учитывают только плоскопараллельные перемещения подсистем технологической системы по координатным осям декартовой системы координат XYZ [5, 6, 12]. Такой подход к моделированию процесса возникновения погрешностей обработки для деталей с габаритными размерами одного порядка по всем коор-

динатным направлениям допустим. На практике нередко встречаются случаи обработки деталей с габаритными размерами, резко отличающимися в разных направлениях, например, длинные валы (преобладают линейные размеры), диски и фланцы (преобладают диаметральные размеры). В этих случаях на погрешность обработки в значительной степени оказывают влияние повороты обрабатываемой заготовки, особенно в направлениях с резко различающимися габаритными размерами, и для этого возникает необходимость в создании полнофакторных моделей точности обработки, учитывающих также и угловые перемещения. Исследования других работ [1–4, 13–26] показывают, что в этой области работы носят частный характер и охватывают некоторые параметры. В этих работах часто встречаются исследования многоинструментной обработки, носящие экспериментальный характер. Математическое моделирование задачи и наряду с этим спецификация многоинструментной обработки, можно сказать, не встречаются полно ни в одном источнике. Самое важное, что эти модели не согласуются с общими законами механики упругодеформируемых систем, поэтому не могут использоваться для создания единой теории точности обработки, учитывающей возможные угловые перемещения подсистем технологической системы.

В промышленности применяются системы автоматизированного проектирования операций на современных многоцелевых станках с ЧПУ, однако и здесь не предусмотрены возможности повышения точности обработки и производительности многоинструментной обработки путем методики численного определения подач на основе моделирования упругих перемещений технологической системы с учетом ограничений по точности размеров и взаимного влияния одновременно работающих инструментов.

На современных многоцелевых станках с ЧПУ решение задачи наложения технологических переходов для двухсуппортных токарных станков в имеющихся в наличии автоматизированных системах программирования операций проводится в ручном режиме методом проб и ошибок. А это еще раз подтверждает отсутствие научно обоснованной методики по проектированию многоинструментной многосуппортной обработки на многоцелевых станках с ЧПУ и показывает необходимость ее разработки.

Методика исследований

Точность выполняемых размеров является основным требованием при проектировании, наладке и реализации технологического процесса. Поэтому основной задачей параметризации проектируемого технологического процесса является расчет припусков и операционных размеров, составляющих единый раздел «Размерный анализ технологического процесса». Другой задачей этапа параметризации является расчет режимов резания [8]. Выполняемые размеры в многоинструментных наладках и промежуточные припуски напрямую связаны с параметрами режимов резания. По этой причине эти две задачи параметризации технологического процесса должны решаться одновременно [5, 6]. Основу матричной теории многоинструментной обработки составляют математические модели точности выполняемых размеров инструментами в многоинструментных наладках. Поэтому современный уровень математических моделей формирования погрешностей размеров в многоинструментных наладках представляет особый интерес.

Как установлено в науке технологии машиностроения, точность обработки определяется целым комплексом ряда случайных и закономерных факторов, их взаимным влиянием и взаимной связью: упругие перемещения технологической системы, размерный износ режущего инструмента, геометрическая неточность звеньев технологической системы, температурные деформации, погрешности расположения заготовок на станке и погрешности наладки их на выполняемый размер, рассеяние припусков заготовок и их физико-механических свойств и т. д. В значительной степени на точность обработки влияют и режимы резания [8, 9].

Количественным свойством точности обработки является погрешность обработки. Эта погрешность обработки выделяет степень несоответствия форм и размеров реальной детали заданной идеальной схеме в конструкции.

Все элементарные составляющие погрешности условно можно разделить на две группы [8].

1. Не зависящие от режимов резания или слабо от них зависящие элементарные составляющие погрешности (мало): погрешность размерного износа режущего инструмента ($\Delta_{\text{и}}$), геометрическая неточность звеньев технологической

системы ($\sum \Delta_{\text{ф}}$); погрешности температурных деформаций ($\sum \Delta T$); погрешности установки заготовок на станке (ϵ), погрешность наладки заготовки на выполняемый размер ($\Delta_{\text{н}}$).

2. Элементарная составляющая погрешность, полностью определяемая режимами резания: погрешность упругих перемещений технологической системы ($\Delta_{\text{у}}$).

Погрешности первой группы не представляют никакого интереса во время разработки имитационных моделей, определенных для проектирования технологического процесса. Эти составляющие участвуют как постоянные (константы) в имитационных моделях. Их значения берутся из обширной справочной литературы.

Во время моделирования точности обработки в результате упругих перемещений технологической системы от влияния сил резания особое место занимает элементарная погрешность $\Delta_{\text{у}}$, возникающая в технологической системе. Ее значение определяется режимами резания, особенностями технологической системы. По этой причине элементарная погрешность $\Delta_{\text{у}}$ выступает здесь как основной управляемый объект и требуется ее математическое выражение.

Из-за искажения выполняемого размера на практике более востребована другая характеристика точности обработки – значение поля рассеяния выполняемого размера. По причине взаимного действия силы для многоинструментных наладок установлено два граничных случая [5, 6]: опозитный и сопозитный. В опозитной наладке все составляющие силы резания одного суппорта направлены против соответствующих составляющих другого суппорта. Такие наладки обычны для токарно-револьверных автоматов с кулачковым управлением и токарных многошпиндельных автоматов, а в сопозитных наладках все соответствующие составляющие силы резания обоих суппортов направлены в одну сторону. На современной группе токарных станков с ЧПУ обе наладки используются в равной степени.

На основании вышесказанного можно отметить, что для разработки теории численного проектирования многоинструментных наладок необходимы комплексные модели искажения выполняемых размеров и их полей рассеяния. Эти модели должны учитывать структуру многоинструментных наладок – различного типа резцы продольного или поперечного суппорта,

одновременную работу продольного и поперечного суппорта.

Механизм формирования поля рассеяния в двухсуппортных опозитных наладках по сравнению с односуппортной обработкой чрезвычайно сложен [6]. Рассеяние прочностных свойств материала заготовок и жесткости технологической системы определяет масштаб интервала рассеяния искажения размеров $\overline{w_1}$ и $\overline{w_2}$, а влияние изменения припуска на суппортах неоднозначно. По причине того что на продольном и поперечном суппорте силы резания направлены друг против друга, изменение припусков Δt_1 и Δt_2

может привести к изменению баланса сил. В результате этого интервалы рассеяния выполняемых размеров бывают трех различных порядков [6, 27]. Объединив все 3 варианта расположения полей рассеяния, возможно сформировать единую модель поля рассеяния с учетом не только плоскопараллельного перемещения технологических подсистем выполняемых размеров на продольном суппорте двухсуппортных опозитных наладок, но и угловые перемещения вокруг базовых точек. Далее дана полнофакторная матричная модель выполняемого диаметрального размера на продольном суппорте:

$$\Delta w_1 = \begin{cases} \omega \left[e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_{02} t_2 \overline{p_t^2} \right] + \left[e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_{02} \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] + \omega \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} + \right. \\ \left. + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} \right] + \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] \\ \text{при } e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_{02} t_2 \overline{p_t^2} + \left(- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} \right) + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} \geq \\ \geq \frac{e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_{02} \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2} + \frac{\left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2}, \\ \text{где } e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_{02} t_2 \overline{p_t^2} + \left(- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} \right) + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} > 0; \\ \left(1 + \frac{\omega}{2} \right) \left[e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_{02} \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] + \left(1 + \frac{\omega}{2} \right) \left[\left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + \right. \\ \left. + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] \\ \text{при } - \frac{e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_{02} \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2} - \frac{\left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2} < \\ < e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_{02} t_2 \overline{p_t^2} + \left(- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} \right) + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} < \\ \frac{e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_{02} \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2} + \frac{\left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2}; \\ - \omega \left[e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_{02} t_2 \overline{p_t^2} \right] + \left[e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_{02} \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] - \omega \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} + \right. \\ \left. + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} \right] + \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] \\ \text{при } e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_{02} t_2 \overline{p_t^2} + \left(- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} \right) + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} \leq \\ \leq - \frac{e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_{02} \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2} - \frac{\left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2}, \\ \text{где } e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_{02} t_2 \overline{p_t^2} + \left(- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} \right) + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} < 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$\overline{p_t^1} = \begin{pmatrix} C_{P_x^1} t_1^{x_{P_x^1}-1} S_1^{y_{P_x^1}} v_1^{z_{P_x^1}} \\ C_{P_y^1} t_1^{x_{P_y^1}-1} S_1^{y_{P_y^1}} v_1^{z_{P_y^1}} \\ C_{P_z^1} t_1^{x_{P_z^1}-1} S_1^{y_{P_z^1}} v_1^{z_{P_z^1}} \end{pmatrix}; \quad \overline{p_t^2} = \begin{pmatrix} C_{P_y^2} t_2^{x_{P_y^2}-1} S_2^{y_{P_y^2}} v_2^{z_{P_y^2}} \\ C_{P_x^2} t_2^{x_{P_x^2}-1} S_2^{y_{P_x^2}} v_2^{z_{P_x^2}} \\ C_{P_z^2} t_2^{x_{P_z^2}-1} S_2^{y_{P_z^2}} v_2^{z_{P_z^2}} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$\overline{p_{\Delta t}^1} = \begin{pmatrix} x_{P_x^1} t_1^{x_{P_x^1}-1} C_{P_x^1} S_1^{y_{P_x^1}} v_1^{z_{P_x^1}} \\ x_{P_y^1} t_1^{x_{P_y^1}-1} C_{P_y^1} S_1^{y_{P_y^1}} v_1^{z_{P_y^1}} \\ x_{P_z^1} t_1^{x_{P_z^1}-1} C_{P_z^1} S_1^{y_{P_z^1}} v_1^{z_{P_z^1}} \end{pmatrix}; \quad \overline{p_{\Delta t}^2} = \begin{pmatrix} x_{P_y^2} C_{P_y^2} t_2^{x_{P_y^2}-1} S_2^{y_{P_y^2}} v_2^{z_{P_y^2}} \\ x_{P_x^2} C_{P_x^2} t_2^{x_{P_x^2}-1} S_2^{y_{P_x^2}} v_2^{z_{P_x^2}} \\ x_{P_z^2} C_{P_z^2} t_2^{x_{P_z^2}-1} S_2^{y_{P_z^2}} v_2^{z_{P_z^2}} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Значение силы резания рассчитывается по известной формуле $p_i = c_i t^{x_i} s^{y_i} v^{z_i}$, $i = x; y; z$ в зависимости от параметра t [11].

Модель поля рассеяния выполняемых размеров на поперечном суппорте в опозитной наладке аналогична. В сопозитной наладке нет взаимного влияния сил резания. Поэтому интервал рассеяния искажения обладает единым

положительным положением. Максимум этого интервала бывает при больших припусках на обоих суппортах, максимальной прочности заготовки и минимальной податливости технологической системы, а минимум получается при обратном положении. В результате для поля рассеяния выполняемого размера на продольном суппорте в сопозитной наладке соответственно получаем:

$$\begin{aligned} \Delta w_1 = & \omega \left[e_{01} t_1 \overline{p_t^1} + e_{02} t_2 \overline{p_t^2} \right] + \left[e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_{02} \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] + \\ & + \omega \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} - a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} \right] + \\ & + \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} - a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

В сопозитной наладке модель поля рассеяния размера на поперечном суппорте аналогична.

Большая часть реальных многоинструментных наладок не обладает однородностью по направлению сил резания. По этой причине не имеется единой расчетной схемы поля рассеяния для неоднородных наладок по направлению. Расчетная схема поля рассеяния определяется отдельно для каждого координатного направления. Так, одна наладка может быть опозитной в направлении одного выполняемого размера, сопозитной – в направлении другого выполняе-

мого размера. Если наладка в рассматриваемом направлении опозитна, то применяется часть разработанных моделей (например, модель (1) для продольного суппорта) в направлении рассматриваемого размера, а для сопозитных наладок применяется часть разработанных моделей в направлении рассматриваемого размера (например, модель (4) для продольного суппорта).

Во время двухинструментной обработки на многоцелевых станках с ЧПУ в результате разработки полнофакторных матричных матема-

тических моделей погрешностей выполняемых размеров с использованием соответствующих входных параметров для решения различных задач практического значения некоторые параметры необходимо определять экспериментально. С определением комплексной характеристики податливости технологической системы для каждой подсистемы, состоящей из двух матричных комплексов – упругости подсистем по координатным осям и координатной матрицы податливости e , характеризующей их взаимное влияние, и, показав сопротивление подсистем поворотам их вокруг координатных осей и угловую матрицу упругости ξ , характеризующую их взаимное влияние, определяем комплексную характеристику податливости подсистем. С помощью этой характеристики возможно рассчитать полное искажение выполняемых размеров для заданной наладки [27].

Во время оценки адекватности теоретической полнофакторной модели искажения размеров после установки заготовки для нивелирования погрешности расположения и формы заготовки предварительно обрабатываем ее на определенный размер, а именно 75 мм. Это, в свою очередь, обеспечивает равное распределение припуска при последующей обработке. Первичную обработку выполняем с небольшой подачей s и припуском t . После этого, измерив ее размер микрометром, отмечаем результат. Для проверки адекватности теоретических зависимостей были сравнены теоретические и экспериментальные значения точности выполняемых размеров. Анализ показал, что эти значения расположены достаточно близко (для указанных в таблице и других случаев разница не превышает 10 %).

Все опыты проведены с оценкой среднего значения с учетом распределения результатов и их соответствия теоретической модели по критерию Стьюдента. Необходимое количество повторов опытов определено по критерию Романовского [28].

Необходимо отметить, что по причине того, что глубина резания t , ее изменение Δt , а также свойство неустойчивости ω технологической системы являются причиной возникновения поля рассеяния выполняемого размера, во время проверки разработанных моделей на эти факторы обращено особое внимание. Другие факторы в рассматриваемых моделях в зависимости от ре-

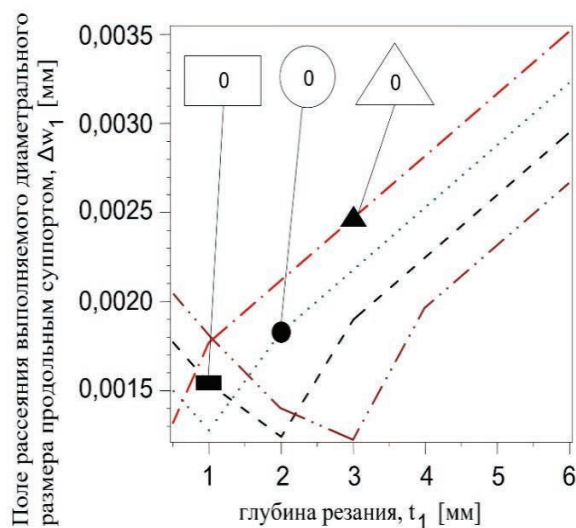
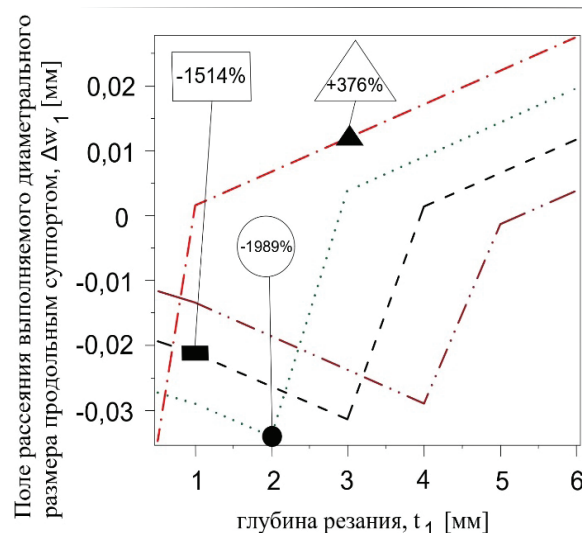
жимов участвуют в моделях посредством силы резания.

Разработанная многофакторная матричная модель с учетом не только плоскопараллельных перемещений технологических подсистем, но и угловых перемещений вокруг базовых точек составляет базу для модели искажения выполняемых размеров в двухсуппортной наладке.

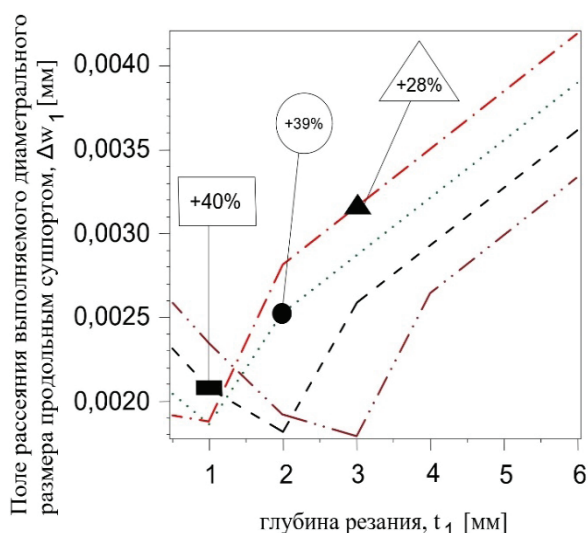
Исследование математических моделей формирования погрешностей выполняемых размеров дает возможность выполнять расчеты точности для различных условий обработки. Эти модели учитывают совместное влияние совокупности факторов – характеристику жесткости подсистем технологической системы, геометрию режущих инструментов, значение притупления инструмента, режимы резания и т. д.

Для проверки работоспособности моделей были рассчитаны варианты с различными исходными данными, определяющими действие формулы, т. е. для различных вариантов выполнено исследование точности обработки. Работоспособность точностных моделей многоинструментной двухсуппортной обработки проверена с помощью влияния технологических факторов и конструктивных размеров наладки на значение поля рассеяния выполняемого диаметрального размера продольным суппортом при многоинструментной двухсуппортной обработке. В качестве примера на рис. 1 показано влияние выполняемого диаметрального размера на продольном суппорте при многоинструментной двухсуппортной обработке на значение поля рассеяния при его значениях $t_1 = 1 \dots 6$ мм, $t_2 = 1 \dots 4$ мм. Базовый вариант: двухсуппортная обработка – продольный и поперечный суппорт, режущая пластина – *CNMG 120408 P04 4225 CoroKey*, заготовка-сталь 45, качество точности – ИТР₁12, ИТР₂12, размеры заготовки $D = L = 74,9$ мм; скорость резания $V_1 = V_2 = 200$ м/мин; подача $s_1 = s_2 = 0,24$ мм/об; $\omega \approx 0,2$; координаты связующих векторов точек O_0 и O_1 относительно базовых точек приложения сил $\overline{P^1}$ и $\overline{P^2}$: $X_0 = 74,9$ мм, $Y_0 = 37,45$ мм, $X_1 = 136$ мм, $Y_1 = 130$ мм.

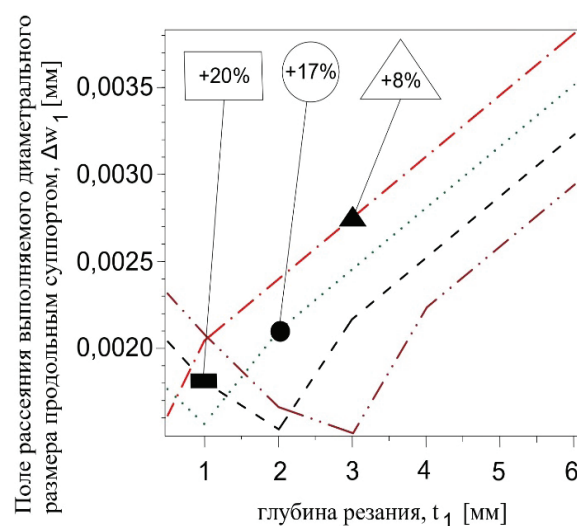
На графиках выделены 3 опорные (ссылки) точки: ● – $t_1 = 2$ мм, $t_2 = 2$ мм; ▲ – $t_1 = 3$ мм, $t_2 = 1$ мм; ■ – $t_1 = 1$ мм, $t_2 = 3$ мм. В базовом варианте (рис. 1, а) для каждой опорной точки показано, на какой ветви графика она находится, а в варианте (рис. 1, б) на соответствующей фор-

 a 

6



6



2

— · — · — · — · — $t_1 = 1$ MM, · · · · · $t_2 = 2$ MM, — — — — — $t_2 = 3$ MM, — · — · — · — · — $t_2 = 4$ MM

Рис. 1. Влияние глубины резания на продольном и поперечном суппорте на значение поля рассеяния выполняемого диаметрального размера продольным суппортом при многоинструментной двухсупортной обработке:

a – базовой вариант; b – $X_0 = 898,8$ мм; $в$ – ИТР₁13; $г$ – ИТР₂13

Fig. 1. Influence of cutting depths in longitudinal and cross carriages on the value of scattering field of diametrical dimension performed by longitudinal carriage in multi-tool two-carriage processing:

a – base variant; $\delta - X_0 = 898.8$ mm; $\epsilon - \text{ITP}_1 13$; $z - \text{ITP}_2 13$

ме этикетках (ярлыках) показано скольжение этих точек относительно базового варианта. Из рис. 1 видно, что, характер кривых Δw полностью совпадает с внедренным мнением для опозитных и сопозитных наладок, т. е. у них имеется 3 ветви (рукава).

На рис. 1, б показано влияние на погрешность формируемого диаметрального размера на продольном суппорте во время увеличения

в 12 раз по сравнению с базовым вариантом отношения длины обрабатываемой детали к диаметру. Отсюда видно, что погрешность формируемого в это время диаметрального размера на продольном суппорте изменяется по базовым точкам от уменьшения -1989% до увеличения $+376\%$. Проведенные исследования показали, что при увеличении отношения длины обрабатываемой детали к диаметру по сравнению с

плоскопараллельных перемещений и угловых перемещений вокруг базовых точек при значениях формируемого на продольном суппорте диаметального размера, равного полю рассеяния во время увеличения длины детали в 6 раз. Здесь также на графиках выделены 3 опорные точки (ссылки): \bullet – $t_1 = 2$ мм, $t_2 = 2$ мм; \blacktriangle – $t_1 = 3$ мм, $t_2 = 2$ мм; \blacksquare – $t_1 = 1$ мм, $t_2 = 2$ мм. В базовом варианте (рис. 2, а) для каждой опорной точки показано, на какой из ветвей графика она находится. Если на рис. 2, а обратим внимание на базовый вариант, то увидим, что для этого варианта процентное количественное выражение угловых перемещений вокруг базовых точек в опорных точках составляет: для \bullet – 10 % (соответственно линейные перемещения 90 %), для \blacktriangle – 15 % (соответственно линейные перемещения 85 %) и для \blacksquare – 125 % (соответственно линейные перемещения 225 %).

Поскольку для случая \blacksquare линейные и угловые перемещения происходят в разных направлениях, то в их суммарном значении их количественное выражение в процентах получается обратным друг другу. В этом случае отношение линейных перемещений к угловым составляет 0,56. Однако это отношение в других вариантах изменяется.

Исследования показывают, что при возрастании отношения длины обрабатываемой детали к ее диаметру в 1,5, 2,5 раза, а также в 5 раз, значение поля рассеяния выполняемого диаметального размера на продольном суппорте изменяется соответственно по базовым точкам от уменьшения –312 % до возрастания 12,5 %, от уменьшения –684 % до возрастания 67 %, от уменьшения –14424 % до возрастания 384 %. Здесь такое изменение погрешности объясняется также возможными угловыми перемещениями, связанными с поворотными моментами технологической системы. Возрастание отрицательных процентов объясняется возрастанием угловых перемещений в суммарном перемещении.

На рис. 1 показано влияние глубины резания на погрешность обработки, однако во время проектирования более выгодны для управления другие параметры – подачи на продольном и поперечном суппорте. Влияние этих факторов показано на рис. 3.

Кроме того, на рис. 3 показано влияние подачи и других технологических факторов на значе-

ние поля рассеяния выполняемого диаметального размера на продольном суппорте во время многоинструментной двухсуппортной обработки. Здесь три опорные точки разделены так: \bullet – $s_1 = 0,2$ мм/об, $s_2 = 0,2$ мм/об; \blacktriangle – $s_1 = 0,2$ мм/об, $s_2 = 0,4$ мм/об; \blacksquare – $s_1 = 0,2$ мм/об, $s_2 = 0,1$ мм/об. Базовый вариант такой же, как мы видим на рис. 1, а также показано изменение и для другого варианта. В базовом варианте (рис. 3, а) показано, на каких ветвях графика расположены эти точки. Знаками соответствующей формы отображено, какую выгоду дает изменение условий обработки для каждого варианта. На рис. 3, б показан вариант, при котором многоинструментная двухсуппортная обработка при определенных значениях может давать более низкие значения погрешности по сравнению с одноинструментной обработкой. Установлено, что, если менять подачи во время многоинструментной двухсуппортной обработки по сравнению с одноинструментной обработкой, то возможно обеспечить более высокую точность. При управлении подачами и изменении других условий обработки возможно значительно понизить или повысить погрешность обработки: для точки \blacksquare – от 42 до +250 %, для точки \bullet – от 2014 до +38 %, для точки \blacktriangle – от 2356 до +1602 %.

Таким образом, еще раз убеждаемся в том, что подачи суппортов во время двухсуппортной обработки являются эффективным инструментом управления. Установленная работоспособность разработанных моделей и общее количество учтенных факторов в результате дают возможность использовать их как основы модели управления многоинструментной двухсуппортной обработкой.

Результаты и их обсуждение

Предлагаются полнофакторные модели полей рассеяния выполняемых размеров во время многоинструментной обработки на многоцелевых станках с ЧПУ. Эти модели учитывают упругость технологической системы по всем 6 степеням свободы и таким образом дают возможность учесть как плоскопараллельные, так и угловые перемещения вокруг базовых точек технологической системы.

Для проверки работоспособности моделей рассчитаны варианты с различными исходными

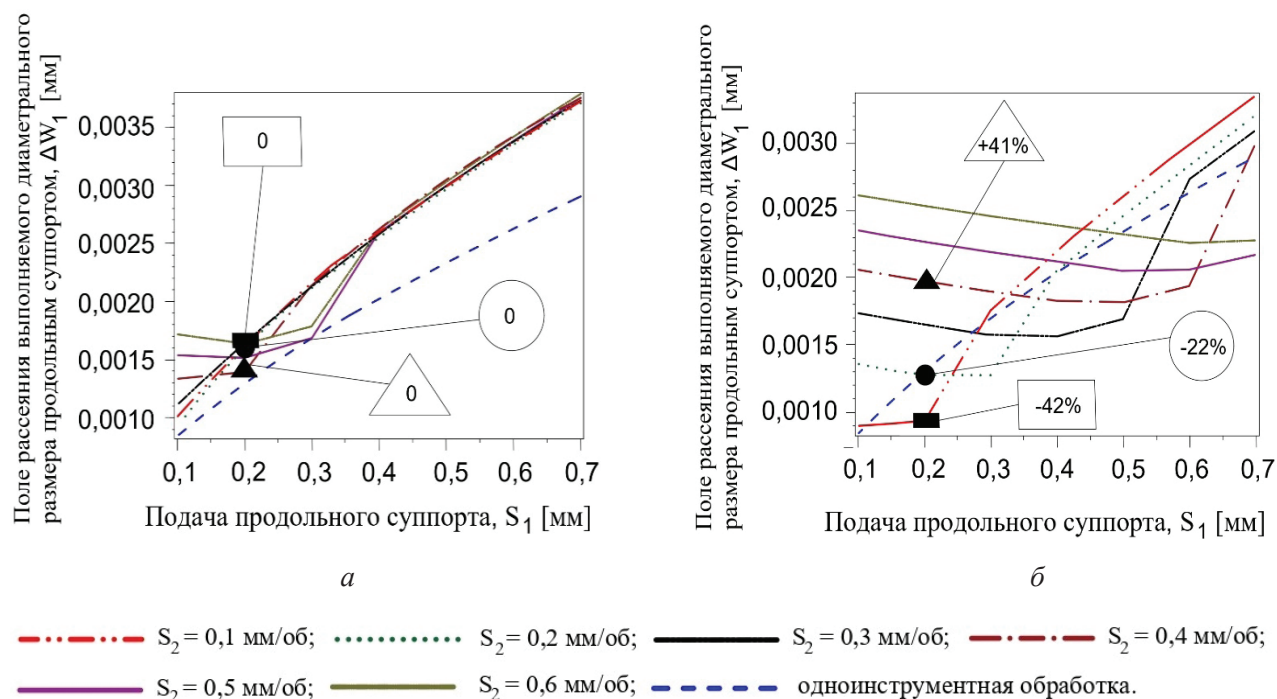


Рис. 3. Влияние подачи и других технологических факторов на значение поля рассеяния выполняемого диаметрального размера продольным суппортом при многоинструментной двухсуппортной обработке. Базовый вариант глубины резания $t_1 = t_2 = 2$ мм:

a – базовый вариант; *б* – $t_2 = 4$ мм

Fig. 3. Influence of feed and other technological factors on value of scattering field of diametrical dimension performed by longitudinal carriage in multi-tool double-carriage processing. Base variant cutting depths $t_1 = t_2 = 2$ mm:

a – base variant; *б* – $t_2 = 4$ mm

данными, определяющими влияние формулы, т. е. для различных вариантов выполнены теоретические исследования точности обработки. Во время теоретических исследований в моделях искажения и рассеяния выполняемых размеров в двухсуппортной наладке по отдельности рассмотрены в зависимости от технологических параметров как плоскопараллельные, так и угловые перемещения вокруг базовых точек технологических подсистем. Влияние в значительной степени на увеличение угловых перемещений с увеличением длины обрабатываемой детали наглядно отображено при помощи разработанных моделей. Этим показана необходимость учета влияния угловых перемещений при обработке нежестких деталей.

Разработанные теоретические полнофакторные модели искажения размеров для двухсуппортных наладок отображают влияние основных технологических и конструктивных факторов, и по этой причине они могут быть использованы

при проектировании операций по учету точностных требований.

Установленная работоспособность полнофакторных матричных моделей и учтенная сфера их действия в результате дают возможность использовать их как основы моделей управления многоинструментной двухсуппортной обработкой. Исследование математических моделей формирования погрешностей выполняемых размеров позволяет выполнить расчет точности для различных условий обработки. Эти модели учитывают совместное влияние совокупности факторов – характеристику жесткости подсистем технологической системы, геометрию режущего инструмента, значение притупления инструмента, режимы резания и т. д.

На базе разработанных моделей создается возможность определения уровня влияния комплекса технологических факторов на точность обработки – структуры многоинструментных наладок, деформационные свойства подсистем

технологической системы, режимов резания. Разработанные модели дают возможность прогнозировать точность обработки для заданных условий (структура наладки, свойства технологической системы, условия обработки) и создают методологическую базу для систем автоматизированного проектирования многоинструментной токарной обработки.

Разработанные полнофакторные матричные модели полей рассеяния выполняемых размеров в многоинструментных двухсуппортных наладках позволяют рассчитать значения погрешности каждого выполняемого размера на стадии проектирования для различных вариантов наладок и тем самым создают условия для обоснования наилучшего варианта. Для использования данной модели в реальном технологическом процессе необходимо переходить или к возможно задаваемому или возможно измеримому значению параметра реальной детали или заготовки. Например, Δw_1 – здесь под действием силы резания рассчитывает составляющее поле рассеяния, обусловленное упругими деформациями технологической системы, в то же время возможно определить только полное поле рассеяния. В модели учитывается изменение глубины резания, однако реально можем оценить первичную погрешность заготовки.

Наличие фактической комплексной матричной характеристики податливости для реального станка дает возможность оценить практическую применимость разработанных матричных моделей точности обработки.

Разработанные модели позволяют определять максимальные допустимые значения режимов резания. Тем самым при заданной точности может быть обеспечена самая высокая производительность во время обработки.

Разработанные модели перемещений во время решения задачи проектирования обработки на многоцелевых станках с ЧПУ возможно трансформировать в модели управления. По причине того, что разработанные модели учитывают координатные и угловые перемещения, можно работать по требованиям значений поля рассеяния выполняемых размеров и погрешности формы управляющих моделей.

Список литературы

1. *Ahmad R., Tichadou S., Hascoet J.Y.* A knowledge-based intelligent decision system for production planning // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 89, iss. 5–8. – P. 1717–1729. – DOI: 10.1007/s00170-016-9214-z.
2. Increasing of lathe equipment efficiency by application of gang-tool holder / *M. Gasanov, A. Kotliar, Y. Basova, M. Ivanova, O. Panamariova* // *Advances in Manufacturing II*. – Cham: Springer, 2019. – Vol. 4. – P. 133–144. – DOI: 10.1007/978-3-030-16943-5_12.
3. A methodology of improvement of manufacturing productivity through increasing operational efficiency of the production process / *J. Trojanowska, A. Kolinski, D. Galusik, M.L.R. Varela, J. Machado* // *Advances in Manufacturing*. – Cham: Springer, 2019. – P. 23–32. – DOI: 10.1007/978-3-319-68619-6_3.
4. Optimization of multi-tool machining processes with simultaneous action / *R. Usubamatov, Z.M. Zain, T.C. Sin, S. Kapayeva* // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 82. – P. 1227–1239. – DOI: 10.1007/s00170-015-6920-x.
5. *Yusubov N.D.* Matrix models of the accuracy in multitool two-support setup // *Russian Engineering Research*. – 2009. – Vol. 29. – P. 268–271. – DOI: 10.3103/S1068798X09030125.
6. *Кошин А.А., Юсубов Н.Д.* Элементы матричной теории точности многоинструментной обработки в пространственных наладках // *Вестник машиностроения*. – 2013. – № 9. – P. 13–17.
7. *Hirsch A.* Werkzeugmaschinen: Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele. – 3. Aufl. – Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. – 441 p. – ISBN 978-3-658-14249-0. – DOI: 10.1007/978-3-658-14249-0.
8. *Антимонов А.М.* Основы технологии машиностроения. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 176 с. – ISBN 978-5-7996-2132-2.
9. *Багров Б.М., Козлов А.М.* Многоцелевые станки. – Липецк: Липец. гос. техн. ун-т, 2004. – 193 с. – ISBN 5-88247-183-4.
10. *Кошин А.А.* Обработка на токарных станках: наладка, режимы резания: справочник. – Челябинск: Сити-Принт, 2012. – 744 с.
11. *Yusubov N.D., Abbasova H.M., Khankishiyev I.A.* Entwicklung einer Projektierungstheorie für die Mehrwerkzeuggestaltung mit den Möglichkeiten der modernen CNC-Werkzeugmaschinen // *Forschung im Ingenieurwesen*. – 2021. – Vol. 85. – P. 661–678. – DOI: 10.1007/s10010-021-00478-7.
12. Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces / *C. Brecher, A. Eppel, S. Neues, M. Fey* // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2015. – Vol. 95. – P. 13–19. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.05.003.

13. Budak E., Ozturk E. Dynamics and stability of parallel turning operations // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 60, iss. 1. – P. 383–386. – DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.028.

14. Azvar M., Budak E. Multi-dimensional chatter stability for enhanced productivity in different parallel turning strategies // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2017. – Vol. 123. – P. 116–128. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2017.08.005.

15. Ozturk E., Comak A., Budak E. Tuning of tool dynamics for increased stability of parallel (simultaneous) turning processes // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – Vol. 360. – P. 17–30. – DOI: 10.1016/j.jsv.2015.09.009.

16. A new mathematical method of modeling parts in virtual CNC lathing and its application on accurate tool path generation / Z. Chang, Z.C. Chen, N. Wan, H. Sun // International Journal Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 95. – P. 243–256. – DOI: 10.1007/s00170-017-1202-4.

17. Multi-cutter turning process stability analysis / A.M. Gousov, M.A. Gousov, D.D. Tung, G. Panovka // Vibroengineering PROCEDIA. – 2018. – Vol. 17. – P. 124–129. – DOI: 10.21595/vp.2018.19800.

18. Effect of distance between two cutting tools over cutting forces and heat generation in multi-tool turning process / R. Kalidasan, M. Yatin, D.K. Sarma, S. Senthilvelan // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 592–594. – P. 211–215. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.211.

19. Influence of cutting speed and offset distance over cutting tool vibration in multi-tool turning process / R. Kalidasan, V. Ramanuj, D.K. Sarma, S. Senthilvelan // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 984–985. – P. 100–105. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.984-985.100.

20. Double tool turning: machining accuracy, cutting tool wear and chip-morphology / R. Kalidasan, S. Senthilvelan, U.S. Dixit, V. Jaiswal // International Journal of Precision Technology. – 2016. – Vol. 6, N 2. – P. 142–158. – DOI: 10.1504/IJPTECH.2016.078189.

21. Kalidasan R. Experimental Investigations on Double Tool Turning Process: a thesis of Dr. of philosophy. – Guwahati, India, 2017. – 133 p.

22. Preliminary experimental investigation on multi-tool turning process / R. Kalidasan, M. Yatin, S. Senthilvelan, D.K. Sarma // Proceedings of the 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference AIMTDR. – Guwahati, 2014. – P. 50-1–50-5.

23. An experimental study of cutting forces and temperature in multi-tool turning of grey cast iron / R. Kalidasan, M. Yatin, D.K. Sarma, S. Senthilvelan, U.S. Dixit // International Journal of Machining and Machinability of Materials. – 2016. – Vol. 18, N 5–6. – P. 540–551. – DOI: 10.1504/IJMMM.2016.078992.

24. Ahmad R., Tichadou S., Hascoet J.Y. A knowledge-based intelligent decision system for production planning // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 89, iss. 5. – P. 1717–1729. – DOI: 10.1007/s00170-016-9214-z.

25. Selection of optimal machining parameters for multi-tool milling operations using a memetic algorithm / N. Baskar, P. Asokan, R. Saravanan, G. Prabhakaran // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 174, iss. 1–3. – P. 239–249. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.032.

26. Орукари Б.Дж. Технологическое обеспечение автоматизированного проектирования операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Минск, 2018. – 22 с.

27. Yusubov N., Abbasova H. Models for machining accuracy in multi-tool adjustment // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 17, N 3. – P. 8067–8085. – DOI: 10.15282/ijame.17.3.2020.01.0605.

28. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 912 с. – ISBN 5-94275-013-9.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on multi-purpose CNC machines

Nizami Yusubov^{a, *}, Heyran Abbasova^b

Department of Machine Building, Azerbaijan Technical University, 25 H. Cavid avenue, Baku, AZ1073, Azerbaijan

^a <https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>, nizami.yusubov@aztu.edu.az, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>, abbasova.heyran@aztu.edu.az

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 July 2021

Revised: 06 August 2021

Accepted: 07 September 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Multi-purpose CNC machines

Machining accuracy

Full-factor accuracy model

Scattering fields of performed dimensions

Matrix of compliance

Plane-parallel matrix of compliance

Angle matrix of compliance

ABSTRACT

Introduction. One of the main reasons that modern multi-purpose CNC machines do not use the capabilities of multi-tool processing is the lack of recommendations for design in this direction and, accordingly, for adjustment schemes. The study of the possibilities of multi-tool processing on multi-purpose machines is the subject of the work. **The purpose of research:** The problem of developing full-factor matrix models of dimensional accuracy and its sensitivity to the machining process is considered to increase the machining efficiency while ensuring machining accuracy using the technological capabilities of multi-tool machining on modern multi-purpose CNC machines. For this purpose, full-factor matrix models of the size scattering fields performed on multi-tool double-carriage adjustments have been developed, taking into account the cases of processing parts with dimensions that differ sharply in different directions, which are often encountered in practice, and in this case, the significant influence of the turns of the workpiece on the processing error, especially in directions with sharply different overall dimensions. **Results of research:** The developed accuracy models make it possible to calculate not only plane-parallel displacements of the technological system for double-carriage adjustments, but also angular displacements around base points, take into account the combined effect of many factors – a complex characteristic of the subsystems of the technological system (plane-parallel matrix of compliance and angular matrix of compliance), the geometry of the cutting tool, the amount of bluntness of the tool, cutting conditions, etc. As a result, based on the developed accuracy models, it is possible to obtain several ways to control multi-tool machining, including improving the structure of multi-tool adjustments, calculating the limiting values of cutting conditions. Based on the developed full-factor matrix models, it became possible to develop recommendations for the design of adjustments and the creation of an automated design system for multi-tool machining for a group of modern multi-purpose CNC lathes. **Scope of the results:** The results obtained can be used to create mathematical support for the design of operations in CAD-systems provided for multi-tool multi-carriage machining performed on multi-purpose machines. **Conclusions:** The developed models and methodology for simulating the machining accuracy make it possible to increase the accuracy and efficiency of simultaneous machining, to predict the machining accuracy within the specified conditions.

For citation: Yusubov N.D., Abbasova H.M. Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on multi-purpose CNC machines. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20. (In Russian).

References

1. Ahmad R., Tichadou S., Hascoet J.Y. A knowledge-based intelligent decision system for production planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 89, iss. 5–8, pp. 1717–1729. DOI: 10.1007/s00170-016-9214-z.
2. Gasanov M., Kotliar A., Basova Y., Ivanova M., Panamariova O. Increasing of lathe equipment efficiency by application of gang-tool holder. *Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, Springer, 2019, vol. 4, pp. 133–144. DOI: 10.1007/978-3-030-16943-5_12.

* Corresponding author

Yusubov Nizami D., D.Sc. (Engineering), Professor

Azerbaijan Technical University,

25 H. Javid avenue,

AZ 1073, Baku, Azerbaijan

Tel.: +994 (55) 324 50 12, e-mail: nizami.yusubov@aztu.edu.az

3. Trojanowska J., Kolinski A., Galusik D., Varela M.L.R., Machado J. A methodology of improvement of manufacturing productivity through increasing operational efficiency of the production process. *Advances in Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, Springer, 2019, pp. 23–32. DOI: 10.1007/978-3-319-68619-6_3.
4. Usubamatov R., Zain Z.M., Sin T.C., Kapaeva S. Optimization of multi-tool machining processes with simultaneous action. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 82, pp. 1227–1239. DOI: 10.1007/s00170-015-6920-x.
5. Yusubov N.D. Matrix models of the accuracy in multitool two-support setup. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29, pp. 268–271. DOI: 10.3103/S1068798X09030125.
6. Koshin A.A., Yusubov N.D. Elementy matrichnoi teorii tochnosti mnogoinstrumentnoi obrabotki v prostranstvennykh naladkakh [Elements of matrix theory of multitool processing accuracy in three-dimensional setups]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 2013, no. 9, pp. 13–17. (In Russian).
7. Hirsch A. *Werkzeugmaschinen: Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. 3. Aufl. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016. 441 p. ISBN 978-3-658-14249-0. DOI: 10.1007/978-3-658-14249-0.
8. Antimonov A.M. *Osnovy tekhnologii mashinnostroeniya* [Fundamentals of mechanical engineering technology]. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2017. 176 p. ISBN 978-5-7996-2132-2.
9. Bagrov B.M., Kozlov A.M. *Mnogotselevye stanki* [Multipurpose machines]. Lipetsk, LSTU Publ., 2004. 193 p. ISBN 5-88247-183-4.
10. Koshin A.A. *Obrabotka na tokarnykh stankakh: naladka, rezhimy rezaniya*. Spravochnik [Processing on lathes: adjustment, cutting conditions. Handbook]. Chelyabinsk, Siti-Print, 2012. 744 p.
11. Yusubov N.D., Abbasova H.M., Khankishiyev I.A. Entwicklung einer Projektierungstheorie für die Mehrwerkzeuggestaltung mit den Möglichkeiten der modernen CNC-Werkzeugmaschinen. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2021, vol. 85, pp. 661–678. DOI: 10.1007/s10010-021-00478-7.
12. Brecher C., Eppler A., Neues S., Fey M. Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, vol. 95, pp. 13–19. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.05.003.
13. Budak E., Ozturk E. Dynamics and stability of parallel turning operations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2011, vol. 60, iss. 1, pp. 383–386. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.028.
14. Azvar M., Budak E. Multi-dimensional chatter stability for enhanced productivity in different parallel turning strategies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, vol. 123, pp. 116–128. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2017.08.005.
15. Ozturk E., Comak A., Budak E. Tuning of tool dynamics for increased stability of parallel (simultaneous) turning processes. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, vol. 360, pp. 17–30. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.09.009.
16. Chang Z., Chen Z.C., Wan N., Sun H. A new mathematical method of modeling parts in virtual CNC lathing and its application on accurate tool path generation. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95, pp. 243–256. DOI: 10.1007/s00170-017-1202-4.
17. Gousskov A.M., Gousskov M.A., Tung D.D., Panovka G. Multi-cutter turning process stability analysis. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2018, vol. 17, pp. 124–129. DOI: 10.21595/vp.2018.19800.
18. Kalidasan R., Yatin M., Sarma D.K., Senthilvelan S. Effect of distance between two cutting tools over cutting forces and heat generation in multi-tool turning process. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 592–594, pp. 211–215. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.211.
19. Kalidasan R., Ramanuj V., Sarma D.K., Senthilvelan S. Influence of cutting speed and offset distance over cutting tool vibration in multi-tool turning process. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 984–985, pp. 100–105. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.984-985.100.
20. Kalidasan R., Senthilvelan S., Dixit U.S., Jaiswal V. Double tool turning: machining accuracy, cutting tool wear and chip-morphology. *International Journal of Precision Technology*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 142–158. DOI: 10.1504/IJPTech.2016.078189.
21. Kalidasan R. *Experimental Investigations on Double Tool Turning Process*. A thesis of Dr. of Philosophy. Guwahati, India, 2017. 133 p.
22. Kalidasan R., Yatin M., Senthilvelan S., Sarma D.K. Preliminary experimental investigation on multi-tool turning process. *Proceedings of the 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference AIMTDR*, Guwahati, 2014, pp. 50-1–50-5.
23. Kalidasan R., Yatin M., Sarma D.K., Senthilvelan S., Dixit U.S. An experimental study of cutting forces and temperature in multi-tool turning of grey cast iron. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2016, vol. 18, no. 5–6, pp. 540–551. DOI: 10.1504/IJMMM.2016.078992.

24. Ahmad R., Tichadou S., Hascoet J.Y. A knowledge-based intelligent decision system for production planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 89, iss. 5, pp. 1717–1729. DOI: 10.1007/s00170-016-9214-z.
25. Baskar N., Asokan P., Saravanan R., Prabhakaran G. Selection of optimal machining parameters for multi-tool milling operations using a memetic algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 174, iss. 1–3, pp. 239–249. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.032.
26. Orukari B.Dzh. *Tekhnologicheskoe obespechenie avtomatizirovannogo proektirovaniya operatsii mekhanicheskoi obrabotki na dvukhsupportnykh tokarnykh stankakh s ChPU*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Technological support for computer-aided design of machining operation on double-slide CNC lathes. PhD. eng. sci. diss.]. Minsk, 2018. 22 p.
27. Yusubov N., Abbasova H. Models for machining accuracy in multi-tool adjustment. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 8067–8085. DOI: 10.15282/ijame.17.3.2020.01.0605.
28. Dal'skii A.M., Kosilova A.G., Mesheryakov R.K., Suslov A.G., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya*. V 2 t. T. 1 [Handbook of a mechanical engineer. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 912 p. ISBN 5-94275-013-9.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).