

Научная статья

УДК 621.914

doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-15-23

Исследование отклонений формы изделий из быстрорежущей стали при точении фрезерованием на станках с ЧПУ

Георгий Валерьевич Матлыгин¹, аспирант

Андрей Владиславович Савилов², к.т.н.

Андрей Юрьевич Николаев³, к.т.н.

Сергей Анатольевич Тимофеев⁴, мл. науч. сотр.

^{1, 2, 3, 4} Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

¹ gmatlygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5484-6250>

² saw@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0003-2028-4162>

³ andrnikolajev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3484-938X>

⁴ sevans@ex.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0003-2412-4086>

Аннотация. Представлено исследование процесса формирования отклонений формы цилиндрических образцов из быстрорежущей стали, обработанных методом точения фрезерованием на токарном обрабатывающем центре с числовым программным управлением (ЧПУ) с дополнительной приводной осью. Технологическое обеспечение качества изделий из быстрорежущей стали, обработанных методом точения фрезерованием на токарном обрабатывающем центре с ЧПУ с дополнительной приводной осью путем снижения отклонения формы. Планирование эксперимента выполнено по методу Тагути с четырьмя факторами и тремя уровнями. Эксперимент проводился на токарном обрабатывающем центре DMG NEF400 с дополнительной приводной осью, позволяющей выполнять обработку вращающимся инструментом. Были использованы образцы из быстрорежущей стали Р6М5К5-МП. Обработка проводилась по схеме ортогонального точения фрезерованием. В качестве режущего инструмента была использована концевая твердосплавная фреза ФКЦ 4321. Отклонения от круглости (огранки) оценивалось оптическим методом. Измерение проводилось на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1. Измерения микронеровностей поверхности выполнялось оптическим сканированием поверхности. В результате оптического сканирования поверхности получено облако точек, повторяющее микронеровности цилиндрического профиля измеренного участка заготовки. Полученные данные позволили измерить огранку, возникающую при обработке методом ортогонального точения фрезерованием. Установлено влияние режимов резания на форму и размер максимальных пиков огранки. Наименьшая величина огранки наблюдается при ширине фрезерования a_e в диапазоне 3,5...5,5 мм при высоких значениях подачи на зуб f_z и низкой скорости резания v_c . Образование наибольшей высоты огранки наблюдается при средних значениях величин a_e , a_p , v_c . Показано, что оптический профилометр является эффективным средством измерения огранки. Полученные в работе результаты позволяют спрогнозировать отклонения формы обработанной заготовки из быстрорежущей стали методом точения фрезерованием на станках с ЧПУ. Результаты исследования могут быть использованы для повышения качества изготовления осевого режущего инструмента в инструментальном производстве.

Ключевые слова: точение фрезерованием, фреза, быстрорежущая сталь, огранка, некруглость, отклонения формы

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту Цифровые технологии производства изделий из порошковых и труднообрабатываемых материалов в рамках программы «Приоритет 2030», экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования научно-исследовательской лаборатории технологии высокопроизводительной механической обработки кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств института авиамашиностроения и транспорта, входит в состав научно-исследовательского проектного института «Авиамашиностроительные технологии» ИрННТУ.

Для цитирования: Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Николаев А.Ю., Тимофеев С.А. Исследование отклонений формы изделий из быстрорежущей стали при точении фрезерованием на станках с числовым программным управлением // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 15–23. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-15-23

Investigation of form deviations of high-speed steel (HSS) products under turning-milling operation using automatically programmed tools

Georgy V. Matlygin¹, PhD student
Andrey V. Savilov², PhD Eng.
Andrey Yu. Nikolaev³, PhD Eng.
Sergey A. Timofeev⁴, JRF

^{1, 2, 3, 4} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹ gmatlygin@mail.ru

² saw@istu.edu

³ andrnikolajev@gmail.com

⁴ sevans@ex.istu.edu

Abstract. Investigation of form deviations of cylindrical high-speed steel (HSS) products made under turning-milling operation by CNC-controlled lathe machining center (further CNC) with auxiliary drive axle is given. Technological support of high-speed steel products quality made by turning milling operation on a CNC lathe machining center with an auxiliary drive axle takes effect owing to the shape deviation reduction. Planning of experiments was carried out according to the Taguchi method for four factors and three levels. The experiment was conducted on a DMG NEF 400 lathe machining center having an auxiliary drive axle, which allows machining modes to be performed with a rotating tool. Samples of high-speed steel R6M5K5-MP were used. Machining operation was made according to the scheme of orthogonal turning by milling. A core carbide mill CCM 4321 was used as a cutting tool. Out-of-roundness (lobing) was estimated using optical method. All measurements were carried out on the Bruker Contour GT-K1 optical profilometer. Surface micro-dimensions were measured by optical scanning of the surface. Surface optical scanning resulted in a point cloud was obtained that mirrors micro-dimensions of the cylindrical profile of the piece partmeasured section. The obtained data obtained made it possible to measure a lobing that occurs under orthogonal milling turning method. The influence of cutting modes on the shape and size of the maximum peaks of the cut is proved. The smallest facet pattern value is observed for milling width a_e in the range of 3,5...5,5 mm with high feed values for the tooth f_z and low cutting speed v_c . The largest cut height is observed at the average values of a_e , a_p , v_c . It is an optical profilometer that is an effective means of measuring facet patterns or lobings. The results obtained in the work allow predicting form deviations of a blank made of high-speed steel under turning milling operations on CNC machines. The results of the study can be used to improve rotary cutting tools quality in the tool industry.

Keywords: turning-milling, milling cutter, high-speed steel, facet pattern, out-of-roundness, form deviation

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research on the project Digital technologies for the manufacture of products made of powder and hard-to-process materials within the framework of the «Priority 2030» program, experimental studies were conducted using the equipment of the research laboratory of High-performance machining Technology of the Department of Technology and Equipment of Machine-building Industries of the Institute aircraft engineering and transport, being a part of the research project institute «Aircraft Engineering Technologies» of IrNRTU.

For citation: Matlygin G.V., Savilov A.V., Nikolaev A.Yu., Timofeev S.A. Investigation of form deviations of high-speed steel (HSS) products under turning-milling operation using automatically programmed tools / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 15–23. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-15-23

Введение

Процесс точения фрезерованием был предметом интенсивных исследований в конце 1980-х годов, за которыми последовал ряд практических применений [1, 2]. Однако этот процесс не был исследован так широко, как другие традиционные процессы резания. Технологический метод точение фрезерованием характеризуется тем, что во время обработки вращается не только инструмент, но и деталь [3]. Данный метод механообработки относится к высокоэффективным и применяется при изготовлении осевых режущих инструментов и других изделий сложной формы. Он

позволяет повысить производительность обработки при обеспечении заданного качества изделия по сравнению с обычным точением [4, 5].

Реализация метода точения фрезерованием осуществляется в основном на многозадачных станках с ЧПУ. Однако, современные токарные обрабатывающие центры с приводным инструментом также могут использоваться для его реализации. Так как для токарно-фрезерных операций требуются два вращающихся шпинделя, а именно шпиндели инструмента и обрабатываемой детали, в случае отсутствия шпинделя инструмента, его можно заменить на приводную головку, устанавливаемую в

инструментальную револьверную головку токарного станка.

Ограничивающим фактором для широкого применения метода в условиях реального производства является отсутствие полноценных технологических математических моделей, позволяющих анализировать и оптимизировать процесс резания в виртуальной среде [6]. Предложенные рядом авторов математические модели точения фрезерованием позволяют прогнозировать силы резания, толщину стружки, вибрации, но при этом не дают возможность комплексно оценить параметры качества поверхности. Следует заметить также, что в ряде исследований отсутствует экспериментальное подтверждение полученных теоретических результатов [7]. В связи с этим, в настоящее время операции точения фрезерованием часто выполняются с опорой на опыт исследователей и дорогостоящие эксперименты. При этом в качестве обрабатываемого материала при проведении экспериментов в большинстве случаев используются конструкционные стали и алюминиевые сплавы [8, 9].

Одним из наиболее важных результатов процесса токарного фрезерования является качество поверхности готовой детали. В отличие от токарной обработки, токарно-фрезерный процесс приводит к получению огранки из-за одновременного вращения заготовки и режущего инструмента [10].

Целью данной работы является определение влияния параметров обработки на величину отклонения от круглости при точении фрезерованием быстрорежущей стали, применяемой для изготовления осевых режущих инструментов.

Материалы и методы исследования

Огранка – это отклонение от круглости, характеризующееся низким размером между двумя параллельными плоскостями или поверхностью и точкой, при котором реальный профиль представляет собой многогранную фигуру, как показано на рис. 1. Количественно огранка оценивается также, как и отклонение от круглости [11].



Рис. 1. Огранка, формируемая в процессе ортогональной токарно-фрезерной обработки

Fig. 1. Facet pattern formed in the orthogonal turning-milling operation

Согласно разработкам канадского исследователя Alptunc Comak из Университета Британской Колумбии максимальная высота пика огранки может быть рассчитана как [12]:

$$e_{c \max} = R_w^e \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} - 1 \right), \quad (1)$$

где R_w^e – фактический радиус заготовки; θ – угловая скорость инструмента.

Угловую скорость инструмента рассчитываем по формуле (2)

$$\theta = \frac{2\pi n_w}{n_t N_t} \quad (2)$$

где n_w – скорость вращения заготовки; n_t – скорость вращения инструмента; N_t – количество зубьев инструмента.

Для планирования эксперимента был выбран метод Тагучи, зарекомендовавший себя в исследованиях в качестве мощного инструмента для анализа параметров резания [13, 14]. В работе была использована ортогональная матрица Тагучи с четырьмя факторами и тремя уровнями для исследования влияния всех параметров обработки с помощью небольшого числа экспериментов, что позволяет сократить время и ресурсы для проведения экспериментальных исследований.

В качестве факторов, влияющих на формирование огранки поверхности определены следующие:

- f_z – подача на зуб, мм/зуб;
- a_p – осевая глубина фрезерования, мм;
- a_e – ширина фрезерования, мм;
- v_c – скорость резания, м/мин.

Верхние ($f_{z_{\max}}, a_{p_{\max}}, a_{e_{\max}}, v_{c_{\max}}$), ниж-
ние ($f_{z_{\min}}, a_{p_{\min}}, a_{e_{\min}}, v_{c_{\min}}$) и основные ($f_{z_0}, a_{p_0}, a_{e_0}, v_{c_0}$) уровни факторов представ-
лены в табл. 1.

1. Уровни факторов опыта

1. Levels of experience factors

Фактор	Интервал варьирования	Уровни факторов		
		Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)
f_z , мм/зуб	0,01	0,08	0,09	0,1
a_p , мм	0,5	1	1,5	2
a_e , мм	2,0	2	4	6
v_c , м/мин	20	140	160	180

Метод предусматривает проведение девяти опытов. Матрица плана изображена в табл. 2.

2. Матрица плана опыта

2. Experience Plan Matrix

Номер опыта	f_z , мм/зуб	a_p , мм	a_e , мм	v_c , м/мин
1	0,08	1	2	140
2	0,08	1	4	160
3	0,08	1	6	180
4	0,09	1,5	2	160
5	0,09	1,5	4	180
6	0,09	1,5	6	140
7	0,1	2	2	180
8	0,1	2	4	140
9	0,1	2	6	160

Эксперимент проводился на токарном обра-
батывающем центре DMG NEF400 с дополни-
тельной приводной осью (рис. 2), благодаря кото-
рой возможно выполнять как токарную обра-
ботку, так и обработку вращающимся инструмен-
том (фрезы, сверла, расточные головки и т.д.).



Рис. 2. Токарный обрабатывающий центр DMG NEF400

Fig. 2. Turning machining center DMG NEF 400

В качестве образца для эксперимента ис-
пользовалась заготовка из материала Р6М5К5-
МП (ДИ101-МП), представляющая собой
предварительно проточенный прут с проре-
занными канавками для радиального врезания

фрезы (рис. 3). Быстрорежущая сталь Р6М5К5-
МП, полученная методом порошковой метал-
лургии, применяется для изготовления режу-
щего инструмента такого как: фрезы, сверла,
развертки, зенкеры для обработки среднелеги-
рованных, легированных, коррозионностойких
сталей, жаропрочных сталей и сплавов [15].

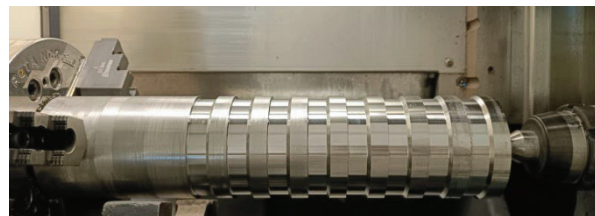


Рис. 3. Общий вид заготовки

Fig. 3. General view of the piece part

Механообработка выполнялась концевой
фрезой для обработки нержавеющей сталей и
жаропрочных сплавов ФКЦ 4321
16×26×82×16, диаметром $d = 16$; число режу-
щих кромок $z = 4$ (рис. 4).

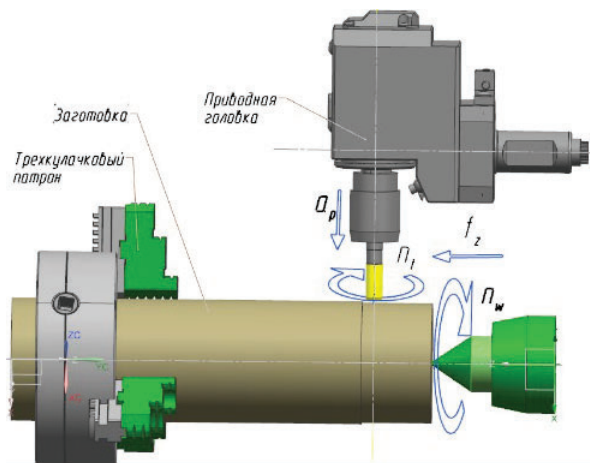


Рис. 4. Фреза ФКЦ 4321
Fig. 4. Milling cutter FCC 4321

Режимы резания назначались в соответствии с рекомендациями производителя инструмента для фрезерования; обработка производилась использованием приводной головки с применением смазочно-охлаждающей жидкости (рис. 5).



а)



б)

Рис. 5. Представление операции ортогональной токарно-фрезерной обработки

а – общий вид зоны обработки; б – схематическое представление

Fig. 5. Presentation of orthogonal turning and milling operation

а – general view of the processing zone; б – representation of the turning-milling operation

В то время как фреза установлена в высокоскоростной приводной головке (максимальная скорость вращения обусловленная

характеристиками приводной головки $n_{t\max} = 5000$ об/мин), заготовка зажимается во вращающемся гидравлическом трехкулачковом патроне, который вращается с меньшей скоростью, чем шпиндель приводной головки (см. рис. 5). Для осуществления процесса резания также необходимо перемещать инструмент вдоль оси вращения детали для создания движения поперечной подачи f_z . При этом скорость резания v_c будет зависеть от вращения детали n_w . Осевая глубина резания a_p регулируется величиной перемещения фрезы в радиальном направлении.

Основными методами оценки отклонения от круглости (огранки) являются:

- измерение на призме;
- измерение на кольце;
- оптический метод измерения.

Схема измерения огранки зависит в первую очередь от четности или нечетности числа граней. Огранку с четным числом граней измеряют по тем же схемам, что и овальность, и легко выявляют при повороте детали. Измерительные головки для этих измерений выбирают исходя из допустимого значения огранки. При контроле на призме (рис. 6, а) величина огранки определяется пересчетом показания отсчетной головки с учетом числа граней и угла призмы. Огранку детали можно измерить с помощью отверстия кольца диаметром, равным наибольшему предельному размеру детали (рис. 6, б). Для этого в условиях мелкосерийного производства рекомендуется использовать регулируемые кольца, а для крупносерийного и массового, приспособление с отверстием постоянного диаметра. Огранку также оценивают по наибольшей разности показаний измерительной головки.

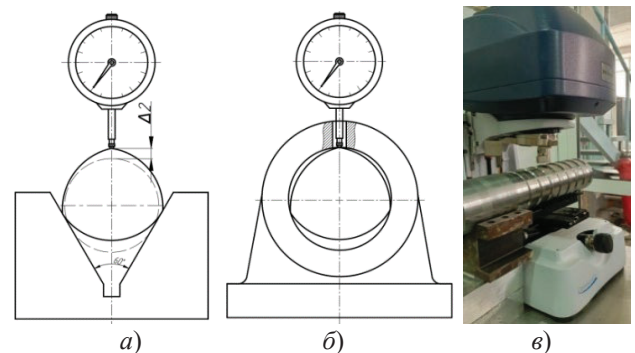


Рис. 6. Методика измерения огранки:

а – на призме; б – в кольце; в – оптический метод
Fig. 6. The method of measuring a facet pattern:
а – with a prism; б – in a ring; с – optical method

Однако в связи с большим количеством граней (расчётное количество пиков граней в зависимости от режимов резания и диаметра составляет 416...899 шт.), в целях оптимизации времени и повышения точности измерения огранки производились с использованием оптического профилометра Bruker Contour GT-K1 (рис. 6, в) на участках размерами 1,7×2,3 мм. Микронеровности были получены в виде облака точек, повторяющих цилиндрический профиль измеренного участка заготовки, из которого можно выявить пики огранки. Вершины пиков огранки на рис. 7 показаны штриховыми зонами. Для снятия показаний огранки в программном обеспечении Vision64 был применен фильтр «выравнивание» для компенсации цилиндричности, а также наклона заготовки, связанной с погрешностью установки.

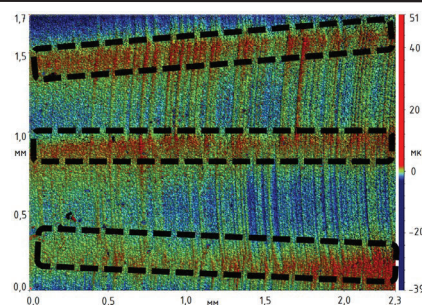


Рис. 7. Топография поверхности под пятикратным увеличением

Fig. 7. The topography of the surface under a fivefold magnification

Результаты и обсуждение

В результате выполнения оптических измерений были получены топографии поверхности, по которым построены графики микронеровностей поверхности, позволяющие обнаружить и измерить огранку, возникающую в процессе обработки точения фрезерованием (рис. 8).

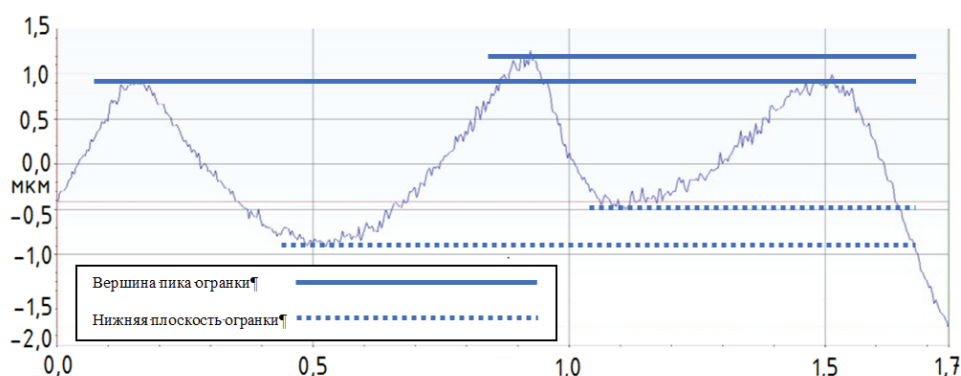


Рис. 8. График микрогеометрии обработанной заготовки

Fig. 8. Graph showing the microgeometry of the processed piece part

Для анализа воспроизводимости формулы (1) сопоставим измеренную высоту профиля огранки с прогнозируемой,

рассчитанной по формуле. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

3. Измеренные и прогнозируемые величины пиков огранки 3. Measured and predicted peak values of the facet pattern

Номер опыта	$e_{c \max 1}$, мм	$e_{c \max 2}$, мм
1	0,0020	0,0031
2	0,0019	0,0030
3	0,0015	0,0027
4	0,0009	0,0034
5	0,0010	0,0045
6	0,0016	0,0044
7	0,0008	0,0049
8	0,0008	0,0043
9	0,0003	0,0060

По полученным формулам (1, 2) построен график (рис. 9), отображающий зависимость высоты пика огранки $e_{c \max}$ от ряда факторов, и установлена степень влияния каждого из них.

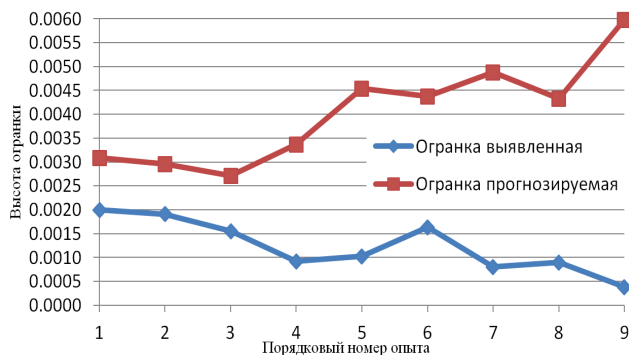


Рис. 9. График сходимости огранки поверхности
Fig. 9. Graph of the convergence of the surface cut

Наблюдается частичная сходимость предсказанных значений с экспериментальными данными. Начиная с 4 и по 9 опыт наблюдаются видимые расхождения в пределах от 0,001 до 0,005 мм. В результате того, что в расчетной формуле не отражено влияние геометрии режущего инструмента и физико-механических свойств обрабатываемого материала, на процесс формирования максимальной высоты пика огранки.

Анализ полученных зависимостей показывает, что зависимость высоты пика огранки от подачи линейная при ее увеличении (рис. 10, а, б, в), однако, имеются зоны, где влияние осевой глубины фрезерования $a_p=1,6...2,0$ мм не существенно (рис. 10, а). Наименьшая величина огранки наблюдается при ширине фрезерования a_e в диапазоне 3,5...5,5 мм (рис. 10, б, в) при высоких значениях подачи на зуб f_z и низкой скорости резания v_c . Однако при средних значениях величин a_e , a_p , v_c (рис. 10, г, д, е) наблюдаются зоны образования наибольшей высоты огранки, вероятно связанной с образованием наклепа на режущую кромку инструмента.

В результате исследования огранки определено наибольшее влияние на ее возникновение ширины фрезерования a_e при значениях $a_e > 2,5$ мм, однако при увеличении a_e свыше $\frac{1}{2}$ диаметра инструмента, возможно возникновение вибраций приводящих к повышенному износу режущей кромки.

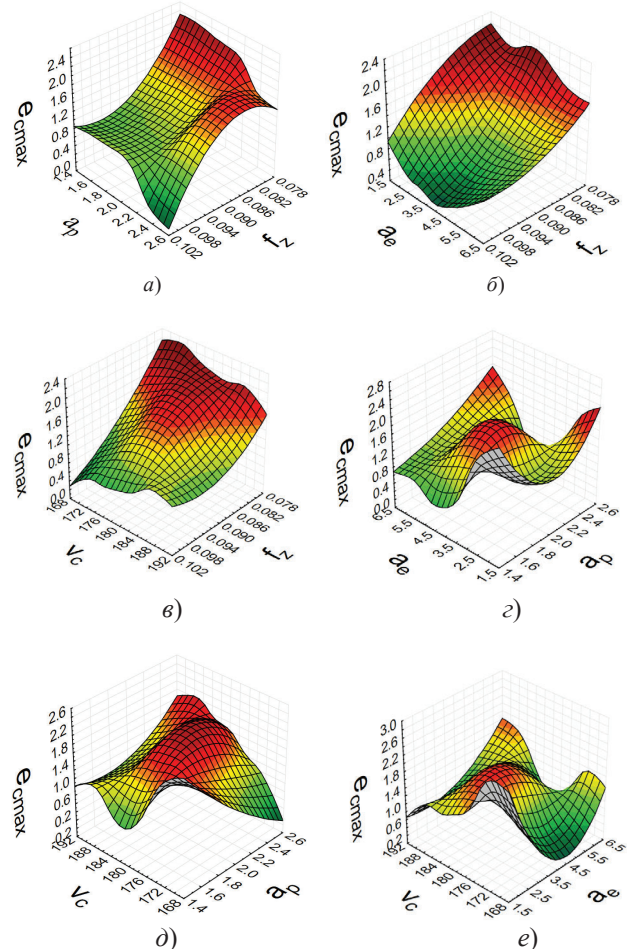


Рис. 10. Зависимости отклонения параметров высоты пика огранки $e_{c \max}$:

а – от осевой глубины фрезерования a_p и подачи на зуб f_z ; б – от ширины фрезерования a_e и подачи на зуб f_z ; в – от скорости резания v_c и подачи на зуб f_z ; г – от ширины фрезерования a_e и осевой глубины фрезерования a_p ; д – от скорости резания v_c и осевой глубины фрезерования a_p ; е – от скорости резания v_c и ширины фрезерования a_e

Fig. 10. Dependences of the deviation of the parameters of the height of the facet pattern peak $e_{c \max}$:

а – on the axial depth of milling a_p and feed to the tooth f_z ; б – on the width of milling a_e and feed to the tooth f_z ; в – on the cutting speed v_c and feed to the tooth f_z ; г – on the milling width a_e and the axial depth of milling a_p ; д – on the cutting speed v_c and the axial depth of milling a_p ; е – on the cutting speed v_c and the milling width a_e

Закключение

Проведено исследование процесса образования огранки при точении фрезерованием образцов из быстрорежущей стали Р6М5К5-МП на токарном обрабатывающем центре с приводным управлением. Определено влияние составляющих подачи инструмента, таких как собственно минутная подача фрезы и

подача, определяемая частотой вращения заготовки на формирование огранки поверхности. Показано, что оптический профилометр является эффективным средством измерения огранки, позволяющим получить объективные результаты с минимальной трудоёмкостью. Достигнутое в ходе проведения опытных работ максимальное значение величины пика составляет 0,002 мм, что является удовлетворительным результатом т.к. соответствует третьей степени точности допуска цилиндричности, круглости профиля продольного сечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Захаров А.Д., Родин П.Р., Татаренко В.Н.** Обработка фасонных поверхностей охватывающим фрезерованием // Резание и инструмент. 1984. № 3. С. 7–11.
2. **Neagu C.** Studiul geometriei functionale a sculei la prelucrarea arborilor netezi prin frezare frontală // Study of Tool's Functional Geometry in Machining Straight Shafts by Face Milling, The 5th Conference on Friction, Lubrication and Wear, Bucharest, 1987.
3. **Schulz H.** High Speed Turn Milling A New Precision Manufacturing Technology for the Machining of Rotationally Symmetrical Workpieces // CIRP Ann Manuf Technol, 1990, vol. 39, P. 107–109. DOI:10.1016/S0007-8506(07)61013-0.
4. **Savas V, Ozay C.** Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter // J Mater Process Technol 2007. vol. 186. P. 279–283. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2006.09.040.
5. **Choudhury SK, Bajpai JB.** Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish // Journal of Materials Processing Techn. 2005. vol. 170:3. P. 487–493. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2004.12.010.
6. **Armarego E.J.A., Karri V., Smith J.R.** Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes-I. theoretical investigation // Int. J. Mach. Tools Manuf. 1994. vol. 34 (6) P. 785–801. DOI:10.1016/0890-6955(94)90059-0.
7. **Солянкин Д.Ю., Ямников А.С., Ямникова О.А.** Методика расчета сил резания при фрезерочении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. № 3. С. 287–292.
8. **Zhibing L, Xibin W.** Characteristic of surface profile and roughness in micro turn-milling of aluminum alloy 2A12 // Technology and Innovation Conference (ITIC 2009), International. 2009. P. 1–4. DOI:10.1049/cp.2009.1424.
9. **Rafai N.H., Islam M.N.** An Investigation into Dimensional Accuracy and Surface Finish Achievable in Dry Turning // Machining Science and Technology. 2009. vol. 13 (4). P. 571–589.
10. **Karagüzel U., Uysal E., Budak E., Bakkal M.** Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015. vol. 91. P. 24–33.

11. **Муцянюк В.И.** Бесцентровое шлифование. Л.: Машиностроение, 1967. 116 с.
12. **Comak A.** Mechanics, dynamics and stability of turn-milling operations (T). University of British Columbia. 2018. DOI:10.14288/1.0368954.
13. **Ozay C., Savas V.** The Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Tangential Turnmilling using Taguchi Method // Advances in Natural and Applied Sciences. 2012. vol. 6. P. 866–874.
14. **Yildiz T., Gür A.K.** The Optimization of Abrasive Wear Behavior of FeCr Coating Composite with Taguchi Method // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011. vol. 5 (12). P. 2394–2402.
15. **Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Пятых А.С., Ушаков В.А.** Технологические аспекты применения точения фрезерованием при изготовлении режущих инструментов // Вестник современных технологий. 2022. № 1 (25). С.16–22.

REFERENCES

1. **Zakharov A.D., Rodin P.R., Tatarenko V.N.** Processing of shaped surfaces by hollow milling // Cutting and tools, 1984, no. 3, pp. 7–11.
2. **Neagu C.** Studiul geometriei functionale a sculei la prelucrarea arborilor netezi prin frezare frontală // Study of Tool's Functional Geometry in Machining Straight Shafts by Face Milling. Proceedings of the 5th Conference on Friction, Lubrication and Wear, Bucharest, 1987.
3. **Schulz H.** High Speed Turn Milling. A New Precision Manufacturing Technology for the Machining of Rotationally Symmetrical Workpieces // CIRP Ann Manuf. Technol, 1990 vol. 39, P. 107–109. DOI:10.1016/S0007-8506(07)61013-0.
4. **Savas V, Ozay C.** Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter // J Mater Process Technol 2007, vol. 186, pp. 279–283. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2006.09.040.
5. **Choudhury SK, Bajpai JB.** Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish // Journal of Materials Processing Techn. 2005, vol.170:3, pp. 487–493. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2004.12.010.
6. **Armarego E.J.A., Karri V., Smith J.R.** Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes-I. theoretical investigation // Int. J. Mach. Tools Manuf. 1994. vol. 34 (6). P. 785–801
7. **Solyankin D.Yu., Yamnikov A.S., Yamnikova O.A.** Methodology of estimation of cutting forces during milling // Izvestiya TulSU. Technical sciences, 2011, no. 3, pp. 287–292
8. **Zhibing L, Xibin W.** Characteristic of surface profile and roughness in micro turn-milling of aluminum alloy 2A12 // Technology and Innovation Conference (ITIC 2009), International. 2009, pp. 1–4. DOI:10.1049/cp.2009.1424.

9. Rafai, N.H., Islam M.N. An Investigation into Dimensional Accuracy and Surface Finish Achievable in Dry Turning // *Machining Science and Technology*, 2009, vol. 13 (4), pp. 571–589.

10. Karagüzel, U., Uysal, E., Budak, E., Bakkal, M. Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015, vol. 91, pp. 24–33.

11. Mutsyanko V.I. Centerless grinding. Leningrad: Mashinostroenie, 1967, 116 p.

12. Comak A. Mechanics, dynamics and stability of turn-milling operations (T). University of British Columbia. 2018. DOI:10.14288/1.0368954.

13. Ozay C., Savas V. The Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Tangential Turnmilling using Taguchi Method // *Advances in Natural and Applied Sciences*. 2012. vol. 6. pp. 866–874.

14. Yildiz T., Gür A.K. The Optimization of Abrasive Wear Behavior of FeCr Coating Composite with Taguchi Method // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011. vol. 5 (12). pp. 2394–2402.

15. Matlygin G.V., Savilov A.V., Pyatykh A.S., Ushakov V.A. Technological aspects of the application of turn-milling in the manufacture of cutting tools // *Bulletin of Modern technologies*, 2022, no. 1 (25), pp. 16–22.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена после рецензирования 18.04.2023; принята к публикации 28.04.2023

The article was submitted 13.04.2023; approved after reviewing 18.04.2023; accepted for publication 28.04.2023

